

BACHELOR THESIS  
Martin Stille

# Empfehlungssystem zur Verbesserung des Raumklimas auf Basis von Sensordaten

---

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK  
Department Informatik

Faculty of Engineering and Computer Science  
Department Computer Science

Martin Stille

# Empfehlungssystem zur Verbesserung des Raumklimas auf Basis von Sensordaten

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang *Bachelor of Science Informatik Technischer Systeme*  
am Department Informatik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Thomas Lehmann  
Zweitgutachter: Prof. Dr. Jessica Broscheit

Eingereicht am: 17. Juli 2024

**Martin Stille**

**Thema der Arbeit**

Empfehlungssystem zur Verbesserung des Raumklimas auf Basis von Sensordaten

**Stichworte**

Raumklima, Empfehlungssystem, Polynomregression, Datenauswertung

**Kurzzusammenfassung**

Ein oft übersehener Faktor unseres Wohlbefindens ist das Innenraumklima. Schlechte Luftqualität kann mit Atemwegsproblemen oder Allergien in Verbindung gebracht werden. Ziel dieser Arbeit ist es, das Raumklima zu verbessern, indem Empfehlungen zum Lüften an den Nutzer ausgesprochen werden. Dabei wurde mit verschiedenen Sensoren das Raumklima erfasst und anhand der aufgezeichneten Raumklimadaten über Polynomregression ein Vorhersagesystem entwickelt, das die Innenraumparameter für einen Lüftungsvorgang ermittelt. Unter Berücksichtigung des Komfortbereiches der verschiedenen Raumklimaparameter wurde eine regelbasierte Heuristik verwendet, um Empfehlungen an den Nutzer auszugeben. Durch die Analyse der verschiedenen Vorhersagen gelang es das Raumklima mit Hinsicht auf Temperatur und CO<sub>2</sub>-Konzentration zu verbessern, was bei der Luftfeuchtigkeit nicht gelang. Eine kritische Betrachtung der erhobenen Daten ergab Potenzial für Missbrauch. Diese Arbeit leistet einen wichtigen Betrag zur Optimierung des Innenraumklimas und bietet Ansätze für zukünftige Verbesserungen.

**Martin Stille**

**Title of Thesis**

Recommendation system for improving the indoor climate based on sensor data

**Keywords**

Indoor climate, recommendation system, polynomial regression, data analysis

**Abstract**

---

An often overlooked factor in our well-being is the indoor climate. Poor air quality can be associated with respiratory problems or allergies. The aim of this work is to improve the indoor climate by providing the user with recommendations for ventilation. The indoor climate was recorded using various sensors and a prediction system was developed based on the recorded indoor climate data using polynomial regression, which determines the indoor parameters for a ventilation process. Taking into account the comfort range of the various indoor climate parameters, a rule-based heuristic was used to make recommendations to the user. By analyzing the various predictions, it was possible to improve the indoor climate with regard to temperature and CO<sub>2</sub> concentration, which was not possible with regard to humidity. A critical examination of the collected data revealed potential for misuse. This work makes an important contribution to optimizing the indoor climate and offers approaches for future improvements.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	1
1.2 Zielsetzung . . . . .	2
<b>2 Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Zusammensetzung von Raumklima . . . . .	3
2.1.1 Was Lüften bedeutet . . . . .	7
2.2 Stand der Technik . . . . .	7
2.2.1 Verwandte Arbeiten . . . . .	7
2.3 Beschreibung Testumgebung . . . . .	8
<b>3 Anforderungsanalyse</b>	<b>10</b>
3.1 Anwendungsfallanalyse . . . . .	10
3.1.1 User Stories . . . . .	10
3.1.2 Use Cases . . . . .	10
3.2 Qualitätsanforderungen . . . . .	12
3.3 Funktionale Anforderungen . . . . .	12
<b>4 Lösungsstrategie</b>	<b>13</b>
4.1 Konzept . . . . .	13
4.2 Datenakquisition . . . . .	15
4.2.1 Sensoren . . . . .	15
4.2.2 Wetter-Application Programming Interface (API) . . . . .	17
4.2.3 Positionierung der Sensoren . . . . .	18
4.2.4 Architektur zur Erfassung der Daten . . . . .	20
4.3 Implementierung des Sensorknotens . . . . .	24

4.4	Datenvorverarbeitung . . . . .	25
4.4.1	Überblick über die erhobenen Daten . . . . .	25
4.4.2	Auswertung der Datensätze zur Modellbildung . . . . .	33
4.5	Vorhersagemodell . . . . .	34
4.5.1	Polynom Interpolation . . . . .	35
4.5.2	Architektur zur Vorhersage . . . . .	37
4.5.3	Ausführung einer Simulation . . . . .	39
4.5.4	Verifikation der Vorhersage . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Empfehlungssystem</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>Kritische Betrachtung der erhobenen Daten</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>52</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>55</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>57</b>
	Selbstständigkeitserklärung . . . . .	59

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Komfortraumtempertur (gestrichelte Linie) nach DIN 15251, Darstellung nach [3] . . . . .	4
2.2	Definition des Komfortbereiches nach DIN 15251, Darstellung nach [11] . .	6
2.3	Grundriss der Versuchswohnung . . . . .	8
4.1	Komponentendiagramm des Empfehlungssystem . . . . .	15
4.2	CO <sub>2</sub> - und realtive Luftfeuchtigkeitsverlauf des BME680 . . . . .	16
4.3	Positionierung der Sensoren im Raum . . . . .	19
4.4	Implementierung des Node-RED Grafens . . . . .	22
4.5	Container-Diagramm der Datenerfassung . . . . .	23
4.6	Deployment-Diagramm auf dem Raspberry Pi . . . . .	24
4.7	Luftdruckverlauf innen und außen . . . . .	25
4.8	Volatile Organic Compound (VOC)-Verlauf innen . . . . .	26
4.9	Exemplarischer CO <sub>2</sub> -Verlauf über zwei Wochen . . . . .	27
4.10	Exemplarischer CO <sub>2</sub> -Verlauf bei Abwesenheit und Ankunft des Bewohners	28
4.11	Temperaturverlauf innen und außen . . . . .	28
4.12	Temperaturverlauf Tag - Nacht Zyklus . . . . .	29
4.13	Temperaturverlauf beim Lüften . . . . .	30
4.14	Temperatur- und CO <sub>2</sub> -Verlauf innen, wenn Person nach Hause kommt . .	30
4.15	Absolute Luftfeuchtigkeitsverlauf innen und außen . . . . .	31
4.16	Absolute Luftfeuchtigkeit innen und außen . . . . .	32
4.17	Absolute Luftfeuchtigkeitsverlauf bei Wäsche im Zimmer . . . . .	32
4.18	Relative Luftfeuchtigkeitsverlauf innen und außen . . . . .	33
4.19	Pipeline zur Datenvorverarbeitung . . . . .	34
4.20	Polynomregression über Temperaturverläufe . . . . .	36
4.21	Komponentendiagramm Vorhersage . . . . .	37
4.22	Außentemperatur 9.1 °C . . . . .	41
4.23	Außentemperatur 10.7 °C . . . . .	42

4.24	Außentemperatur 11.6 °C	42
4.25	Außentemperatur 14.1 °C	43
4.26	Außentemperatur 18.1 °C	43
4.27	CO <sub>2</sub> -Vorhersage und realer Verlauf	44
4.28	CO <sub>2</sub> -Vorhersage und realer Verlauf	45
4.29	Absolute Feuchtigkeit außen 12.7 g/m <sup>3</sup>	46
4.30	Absolute Feuchtigkeit außen 11.6 g/m <sup>3</sup>	46
4.31	Absolute Feuchtigkeit außen 6.6 g/m <sup>3</sup>	47
4.32	Absolute Feuchtigkeit außen 8.32 g/m <sup>3</sup>	47
4.33	Absolute Feuchtigkeit außen 8.25 g/m <sup>3</sup>	48
5.1	Beispielhafte Ausgabe der Empfehlungssystems	50
A.1	Anbringung des Reedkontakts	57
A.2	Beispielhafte Antwort der Wetter-API	58



# Tabellenverzeichnis

2.1	Grenzwerte für VOC nach [1]	6
3.1	Use Case UC-1	11
3.2	Funktionale Anforderungen	12
4.1	Interne Anforderungen an das System	14

# Abkürzungen

**API** Application Programming Interface. v, 17, 21, 23, 53, 54

**HTTP** Hypertext Transfer Protocol. 17, 21

**HVAC** Heating, Ventilation, Air Conditioning. 7

**JSON** JavaScript Object Notation. 38

**MPC** Model Predictive Control. 7

**MQTT** MessageQueuing Telemetry Transport. 20, 21, 23, 24, 49, 53, 54

**MVC** Model, View, Controller. 23

**VOC** Volatile Organic Compound. vii, ix, 6, 14–16, 19, 26, 39, 49

**WLAN** Wireless Local Area Network. 21

# 1 Einleitung

In dem vielfältigen Geflecht von Faktoren, die zu unserem allgemeinen Wohlbefinden und unserer Gesundheit beitragen, ist das Innenraumklima, ein oft übersehener Faktor. Die wahrgenommenen Umweltaspekte, wie CO<sub>2</sub>-Konzentration, Temperatur und Luftfeuchtigkeit und die allgemeinen Umweltbedingungen in geschlossenen Räumen spielen eine entscheidende Rolle - nicht nur bei unserem wahrgenommenen Komfort, sondern auch unserer körperlichen Gesundheit.

Schlechte Luftqualität, unzureichende Belüftung und unbehagliche Temperaturen werden mit einer Reihe von gesundheitlichen Problemen in Verbindung gebracht, wie Atemwegsproblemen oder Allergien. Da die Gesundheit eng mit den Räumen, in denen wir leben, verknüpft ist, wird der Fokus auf die Optimierung des Innenraumklimas zwingend erforderlich.

Des Weiteren geht das Innenraumklima über den Aspekt des Wohlbefindens hinaus. Das Management des Raumklimas spielt auch bei der Instandhaltung der Gebäude eine wichtige Rolle. Übermäßige Luftfeuchtigkeit, suboptimale Belüftung oder ineffizientes Temperaturmanagement können zur Verschlechterung der Bausubstanz beitragen, indem Schimmel hervorrufen und die Nebenkosten in die Höhe getrieben werden.

Deshalb verbessert ein optimales Raumklima nicht nur Gesundheit der Bewohner, sondern kann zusätzlich noch zu wirtschaftlichen Einsparungen führen. Mit diesem Problem zur Optimierung des Raumklimas soll sich in dieser Arbeit beschäftigt werden und ein System entwickelt werden, welches das Raumklima durch Hilfestellungen für den Nutzer verbessert.

## 1.1 Problemstellung

Das Studierendenwerk Hamburg bemüht sich durch die Errichtung immer energieeffizientere Wohnanlagen sowie durch Nachrüstungen in älteren Gebäuden die Heizkosten zu reduzieren. Trotz dieser Bemühungen wird den Mietern falsches Lüften vorgeworfen,

was zur Begründung steigender Mietkosten benutzt wird, die auf die Bewohner umgelegt werden. Da diese Aussagen auf keiner Datengrundlage getroffen wurde, wurde im Umweltaufnahmeausschuss des Studierendenwerks die Entwicklung eines Sensorknotens vorangetrieben, welche verschiedene Raumklimaparameter aufzeichnet und Klarheit schaffen soll. Dieser Sensorknoten löst jedoch nicht das Problem, dass die Bewohner ein Bewusstsein für richtiges Lüften zu erhalten.

### 1.2 Zielsetzung

Deshalb soll in dieser Arbeit ein System entwickelt werden, das den Bewohnern Empfehlung gibt, wann ein guter Zeitpunkt zum Lüften ist und dabei die aktuellen Raumklimaparameter im Innenraum, sowie das aktuelle Wetter betrachtet. Anhand von historischen Daten soll eine Vorhersage getroffen werden, wie sich Raumklimaparameter verändern würden, wenn gelüftet wird. Durch Betrachtung dieser Vorhersage soll beurteilt werden, ob es zum aktuellen Zeitpunkt sinnvoll ist zu Lüften. Dem Nutzer soll dabei eine Begründung gegeben werden, warum es aktuell sinnvoll ist zu Lüften. Das Empfehlungssystem soll helfen, das Raumklima zu verbessern, indem die Nutzer effizienter lüften und somit der Energieverbrauch der Wohnanlage gesenkt wird.

## 2 Grundlagen

In den Grundlagen wird zuerst beschrieben, aus welchen Parametern sich Raumklima zusammensetzt und wie der Komfortbereich für den jeweiligen Parameter definiert ist. Dies ist wichtig, da erstmal das Verständnis für gutes Raumklima geschaffen werden muss, bevor damit begonnen werden kann, dies zu verbessern.

### 2.1 Zusammensetzung von Raumklima

Die Charakterisierung des Raumklimas erfolgt auf Grundlage der physikalischen Eigenschaften eines Raumes. Dazu gehören nicht nur thermische Eigenschaften, die man schnell mit Raumklima assoziiert, wie Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit, sondern auch noch Eigenschaften hinsichtlich der Luftqualität, also die Zusammensetzung der Raumluft aus Gasen, Dämpfen und Partikeln. Zusätzlich gehören zum Raumklima akustische und visuelle Eigenschaften, wie z.B. die Intensität und Zusammensetzung von diversen Frequenzen, die Lautstärke im Raum und die Nachhallzeit. Zusätzlich fließen die verschiedenen Arten von Lichtquellen, deren Farbtemperatur und Lichtstärke in die Betrachtung des Raumklimas ein.[10] Die akustischen und visuellen Eigenschaften sollen in dieser Arbeit nicht betrachtet werden, da die Zielsetzung der Arbeit sich auf die Vorhersage der Raumklimaparameter durch das Lüften fokussiert.

Um eine Bewertung der Komponenten des Raumklimas vornehmen zu können, müssen alle Aspekte bekannt sein, um die Herausforderungen unterschiedlicher Raumtypen erkennen zu können. Die Herangehensweise an ein Klassenzimmer muss zwangsläufig anders sein als die eines Autos. Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevantesten Parameter für ein Einzimmerapartment erläutert:

### Temperatur

Temperatur ist grundsätzlich eine physikalische Größe, die den thermischen Zustand eines Körpers oder eines Systems beschreibt. Der Komfortbereich für Temperatur liegt nach DIN 15251 bei 22 °C bei einer Außentemperatur von unter 16 °C und bei 26 °C bei 26 °C Außentemperatur über 32 °C [3].

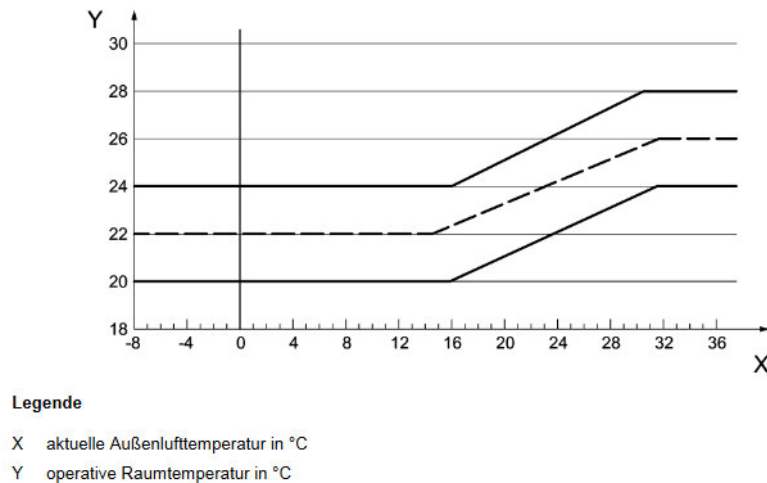


Abbildung 2.1: Komfortraumtemperatur (gestrichelte Linie) nach DIN 15251, Darstellung nach [3]

**Kohlendioxid** Ein weiterer Bestandteil der Luft, der für das Raumklima relevant ist, ist die Konzentration des Gases Kohlendioxid (chemische Summenformel:  $\text{CO}_2$ ). Es ist farb- und geruchlos und ein natürlicher Bestandteil der Umgebungsluft mit einer Konzentration von 400 ppm. Dabei hängt die  $\text{CO}_2$ -Konzentration in Innenräumen hauptsächlich von der Anzahl der Personen im Raum und dem Raumvolumen ab. Dazu kommen noch die Aktivität der Raumnutzer und die Zeitspanne, in der die Raumnutzer anwesend sind.[4] Zusätzlich können Zimmerpflanzen die  $\text{CO}_2$ -Konzentration des Raumes beeinflussen. Ein Bericht des Umweltbundesamtes gibt Leitwerte für die Konzentration von Kohlendioxid in Innenräumen an. Danach gelten Konzentrationen unter 1000 ppm als unbedenklich, Konzentrationen zwischen 1000 und 2000 ppm als auffällig und über 2000 ppm als inakzeptabel [4].

**Luftfeuchtigkeit** Die Luftfeuchtigkeit beschreibt den Gewichtsanteil des gasförmigen Wasserdampfs in der Luft. Ein bestimmtes Luftvolumen kann nur eine gewisse Höchstmenge an Wasserdampf aufnehmen, die abhängig von Temperatur und Luftdruck ist. Die *relative Feuchtigkeit* drückt aus, zu welchem Grad die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist. Bei einer relativen Feuchtigkeit von 50 % enthält die Luft die Hälfte des Wasserdampfes, der sich bei dieser Temperatur maximal lösen kann. Bei 100 % kann die Luft keinen weiteren Wasserdampf mehr aufnehmen, da sie vollständig gesättigt ist.

Die *absolute Feuchtigkeit* dagegen drückt die totale Menge an Wasserdampf, die in einem bestimmten Raumvolumen enthalten ist, aus. Diese wird meist in Gramm pro Kubikmeter ( $g/m^3$ ) angegeben und kann aus der relativen Feuchtigkeit berechnet werden:

$$\text{Luftfeuchtigkeit}_{\text{absolut}}(r, t) = 10^5 \cdot \frac{m_w}{R^*} \cdot DD(r, t) \div (t + 273,15)$$

$$\text{Feuchtigkeit}_{\text{relativ}} = r$$

$$\text{Temperatur} = t$$

$$\text{Molekulargewicht Wasserdampf } m_w = 18.016 \text{ kg/kmol}$$

$$\text{Universelle Gaskonstante } R^* = 8314.3 \text{ J/(kmol} \cdot \text{K)}$$

$$\text{Dampfdruck } DD(r, t) = \frac{r}{100} \cdot 6.1078 \cdot 10^{\frac{(a \cdot t)}{(b+t)}}$$

$$t \geq 0 = \begin{cases} a = 7,5 \\ b = 237,4 \end{cases}$$

$$t < 0 = \begin{cases} a = 7,6 \\ b = 240,7 \end{cases}$$

[13]

Die Wahrnehmung der Luftfeuchtigkeit wird nicht durch die absolute Feuchtigkeit der Luft bestimmt, sondern durch die relative Luftfeuchtigkeit. Somit wird feuchte Luft, mit einer relativen Feuchtigkeit von  $> 80\%$  bei entsprechender Temperatur als schwül empfunden [14]. Abbildung 2.2 zeigt, dass eine relative Luftfeuchtigkeit unter 30 % zu trockenen Schleimhäuten, unter 20% sogar zu Reizungen der Augen und Luftwege führt. Eine obere Grenze für die relative Luftfeuchtigkeit wird bei 60% gesetzt, da darüber die Bildung von Schimmel einsetzt [11]. Deshalb wird der Komfortbereich der Luftfeuchtigkeit zwischen 30 und 60% definiert.

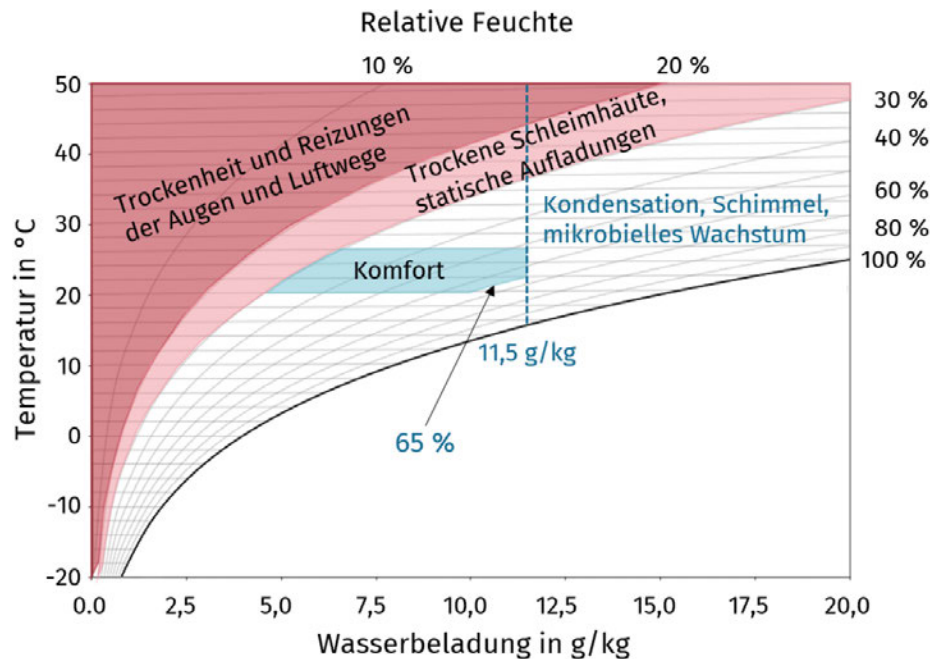


Abbildung 2.2: Definition des Komfortbereiches nach DIN 15251, Darstellung nach [11]

### Flüchtige organische Verbindungen (VOC)

Die englische Abkürzung VOC (Volatile Organic Compounds) für flüchtige organische Verbindungen ist erstmal ein Sammelbegriff für organische Chemikalien, die leicht verdampfen können. Diese können z.B. aus den gefährlichen Stoffen Benzol, Toluol und Xylol[6] oder Kohlenwasserstoffen und Aldehyden bestehen. Die Quellen für VOCs reichen von Materialien zum Bau, über Tabakrauch bishin zur Nahrungsmittelzubereitung. Sie können zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen, Geruchsbelästigungen und Reizungen führen.[5]. Die Grenzwerte werden in Tabelle 2.1 dargelegt.

Bezeichnung	Grenzwerte VOC
hygienisch unbedenklich	unter 150 bis 400 ppb (parts per billion)
hygienisch auffällig	400 bis 1300 ppb
hygienisch bedenklich	1300 bis 4000 ppb
hygienisch inakzeptabel	über 4000 ppb

Tabelle 2.1: Grenzwerte für VOC nach [1]



### 2.1.1 Was Lüften bedeutet

Um im Laufe der Arbeit richtig einordnen zu können, was mit Lüften überhaupt gemeint ist, muss der Begriff einmal definiert werden. Natürliches Lüften bezeichnet den Austausch von Innen- und Außenluft in einem Gebäude oder Raum. Dabei wird verbrauchte Luft mit frischer Luft von außen ersetzt und dient hauptsächlich zur Verbesserung der Luftqualität, sowie der Regulierung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit.

## 2.2 Stand der Technik

Da nun die Grundlagen, wie sich Raumklima zusammensetzt, vermittelt wurden, wird in diesem Abschnitt auf verwandte Arbeiten eingegangen, die im inhaltlichen Zusammenhang stehen, und wie sich diese Arbeit von diesen abgrenzt.

### 2.2.1 Verwandte Arbeiten

Im Paper „Optimal control of Heating, Ventilation, Air Conditioning (HVAC) and window systems for natural ventilation through reinforcement learning“ [9] wird durch eine *reinforcement learning*-Strategie versucht, die Energieeffizienz und die Luftqualität von Gebäuden zu verbessern. Dabei wird die Innen- und Außenumgebung kontinuierlich überwacht, um natürliches Lüften und die Steuerung eines HVAC-Systems zu koordinieren. Die *reinforcement learning*-Strategie wird mit einem heuristischen Regelansatz verglichen und zeigt, dass der *reinforcement learning*-Ansatz effizienter arbeitet, da er zu einer kürzeren Zeit mit Temperaturabweichungen und hoher Luftfeuchtigkeit gab. Als weitere Erkenntnis wurde herausgestellt, dass der *reinforcement learning*-Ansatz besser auf das Verhalten der Bewohner angepasst werden kann, was bei einem heuristischen Ansatz schwer zu erreichen sei.

Ein weiterer Beitrag zur natürlichen Belüftung in Gebäuden bietet „Estimating natural ventilation potential for high-rise buildings considering boundary layer meteorology“ [12]. Darum wurde eine Model Predictive Control (MPC) Ansatz genutzt, um über eine Vorhersage der Innenraumbedingungen, basierend auf Wetterprognosen, die Nutzung der natürlichen Belüftung zu maximieren. Die Arbeit kam zu dem Ergebnis, dass die Zeit der natürlichen Belüftung um über 50% gesteigert werden konnte gegenüber traditioneller Kontrollmethoden. Diese Arbeit zielt darauf ab, die Effektivität der natürlichen

Belüftung durch ein Vorhersagemodell, das auf historisch erhobenen Daten basiert, zu verstärken und dadurch das Raumklima zu verbessern.

### 2.3 Beschreibung Testumgebung

Zunächst wird die Testumgebung beschrieben, in welcher das Empfehlungssystem entwickelt und getestet werden soll. Dazu werden grundlegende Informationen zur Wohnanlage Hammerbrook dargestellt, in der sich das Zimmer befindet, für das das Empfehlungssystem entwickelt wird, und ein Grundriss einer typischen Wohnung gezeigt.

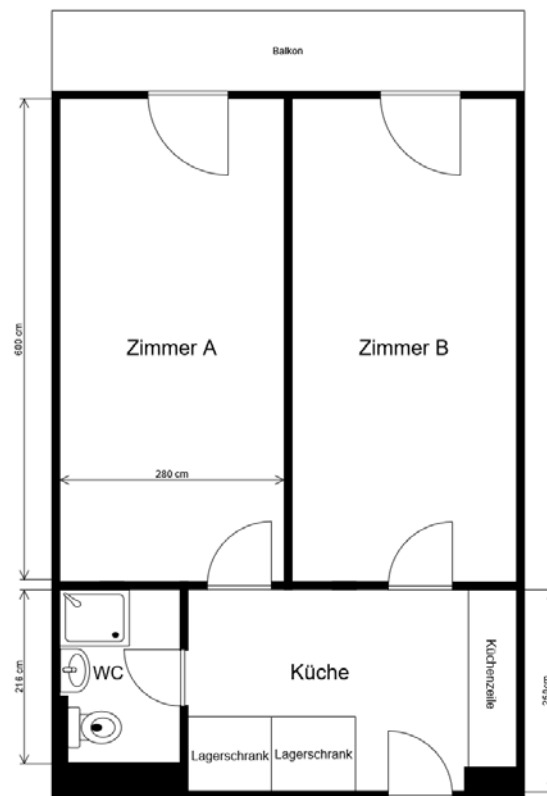


Abbildung 2.3: Grundriss der Versuchswohnung

Die Grafik 2.3 zeigt eine typische zweier Wohngemeinschaft in der Wohnanlage Hammerbrook. Die Wohnanlage wurde 2012 erbaut und wird als KFW-Effizienzhaus 40 eingestuft. Jedes Zimmer verfügt über einen Frischluftzugang durch eine Lüftungsanlage. Zusätzlich verfügen Küche und Bad jeweils über eine Abluft. Jedes Zimmer verfügt zusätzlich über ein Fenster oder eine Balkontür, mit der manuell gelüftet werden kann. Die Zimmer haben jeweils eine Größe von  $16.8 \text{ m}^2$ . Die Temperatur wird über die Lüftungsanlage zentral in der Wohnanlage festgelegt und kann von Mietern nicht beeinflusst werden. Die Heizungen in den Räumen heizen nur, wenn die Lüftungsanlage die vorgegebene Temperatur nicht halten kann. Der Nutzer selbst kann die Heizung nicht steuern. Die Mieten in den Wohnanlagen des Studierendenwerkes Hamburg setzten sich pauschal zusammen, d.h. der Mieter zahlt einen Fixpreis, bei dem alle Kosten inklusive sind. Somit müssen sich die Mieter nicht um Strom, Warmwasser, Heizen, Internet und Fernsehen, etc. kümmern. Dies bedeutet jedoch, dass der Mieter nicht direkt für seinen Energiebedarf zahlt. Das ermutigt „verschwenderischen“ Umgang, da der einzelne Mieter nicht die Auswirkungen seines persönlichen Verhaltens bemerkt, durch z.B. eine erhöhte Strom- oder Gasrechnung. Diese wird stattdessen auf alle Mieter der Wohnanlage verteilt.

## 3 Anforderungsanalyse

### 3.1 Anwendungsfallanalyse

Im Folgenden werden Anforderungen an das Empfehlungssystem ermittelt. Dafür werden zuerst User Stories und Use Cases identifiziert und die sich daraus ableitenden funktionalen Anforderungen aufgestellt.

#### 3.1.1 User Stories

Diese User Stories wurden identifiziert:

*„Als Nutzer möchte ich angezeigt bekommen, wann der richtige Zeitpunkt zum Lüften erreicht ist, damit ich nicht unnötig Lüfte oder das Raumklima verschlechtere.“*

*„Als Vermieter möchte ich, dass meine Mieter möglichst effizient lüften und heizen, da durch die Pauschalmiete Energiekosten nicht direkt auf die Mieter umgelegt werden können.“*

#### 3.1.2 Use Cases

Aus den User Stories wurden folgende Use Cases abgeleitet:

Tabelle 3.1: Use Case UC-1

Abschnitt	Inhalt
Name	Raumklima verbessern
Autor	Martin Stille
Kurzbeschreibung	Das System stellt fest, dass das Raumklima aktuell schlecht ist und dieses sich durch Lüften verbessern würde.
Auslösendes Ereignis	Das System bewertet die Raumklimaparameter als schlecht.
Akteure	System, Nutzer
Vorbedingung	Fenster geschlossen, Nutzer anwesend
Nachbedingung	Fenster geschlossen
Ergebnis	Das Raumklima wurde verbessert
Hauptszenario	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Das System stellt fest, dass das Raumklima aktuell schlecht ist.</li><li>2. Das System bewertet, ob das Raumklima durch Lüften verbessert werden kann.</li><li>3. Das System teilt dem Nutzer mit, dass dieser lüften soll und warum.</li><li>4. Der Nutzer lüftet.</li><li>5. Das System bewertet das aktuelle Raumklima, bis es in einen akzeptablen Bereich erlangt.</li><li>6. Das System teilt dem Nutzer mit, dass er aufhören soll zu lüften</li><li>7. Der Nutzer schließt das Fenster.</li></ol>
Alternativszenarien	<ol style="list-style-type: none"><li>5a. Das System befindet sich zu lange im Zustand lüften.</li><li>5b. Das System fordert den Nutzer auf, das Lüften zu beenden.</li></ol>
Fehlerszenarien	4. Der Nutzer lüftet nicht
Qualitäten	Benutzbarkeit

## 3.2 Qualitätsanforderungen

**Benutzbarkeit** Da die Wohnanlagen eine hohe Fluktuation haben und somit häufig von neuen Bewohner genutzt wird, kann eine zu steile Lernkurve oder eine aufdringliche Nutzerschnittstelle, die sehr stark in den Alltag des Nutzers eingreift, zum Scheitern der Einführung des Systems führen. Deshalb steht im Vordergrund der Benutzbarkeit, die vorher genannten Probleme nicht aufzuweisen.

## 3.3 Funktionale Anforderungen

ID	Anforderungen
R-F-1	Das System soll dem Nutzer mitteilen, wann gelüftet werden soll.
R-F-2	Das System soll dem Nutzer mitteilen, warum gelüftet werden soll.
R-F-3	Das System soll dem Nutzer mitteilen, wann das Lüften beendet werden soll.

Tabelle 3.2: Funktionale Anforderungen

## 4 Lösungsstrategie

Um das Empfehlungssystem zu entwickeln, wird zuerst ein Konzept und die daraus folgende Aufteilung in die Hauptkomponenten dargestellt. Als Nächstes wird sich damit befasst, wie die Daten gemessen und gespeichert werden können und welchen Einfluss die Positionierung der Sensoren auf die Messwerte hat. Es wird weiterhin betrachtet, wie aus den Daten ein Modell erstellt werden kann, welches eine Vorhersage zum Lüften trifft.

### 4.1 Konzept

Aus Sicht des Nutzers soll das Empfehlungssystem nur als eine Komponente erkennbar sein, da aber unter dem Aspekt der Erweiterbarkeit des Systems gearbeitet wird, wird das System in verschiedene Komponenten aufgeteilt, sodass diese ausgetauscht werden können. Somit ist gewährleistet, dass das Empfehlungssystem nicht nur für die eine Wohnanlage entwickelt wird, sondern eine leichte Migration in eine andere möglich ist. Die Tabelle 4.1 zeigt die internen Anforderungen an das System.

ID	Interne Anforderungen
R-I-1	Das Empfehlungssystem muss die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit, sowie die CO <sub>2</sub> - und VOC-Konzentration erfassen können.
R-I-2	Das Empfehlungssystem muss feststellen können, ob gerade gelüftet wird.
R-I-3	Das Empfehlungssystem braucht eine Schnittstelle, um dem Nutzer die Empfehlungen mitzuteilen.
R-I-4	Das Empfehlungssystem braucht eine Schnittstelle, um Klimaparameter wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit von draußen zu erfassen.
R-I-5	Das Empfehlungssystem braucht Modelle, die die verschiedene Raumklimaparameter des Raumes vorhersagen.

Tabelle 4.1: Interne Anforderungen an das System

Das System wird grundsätzlich in die zwei Hauptkomponenten *Empfehlung* und *Vorhersage* aufgeteilt.

Im ersten Teil der Lösungsstrategie soll zunächst die Komponente *Vorhersage* betrachtet werden. Diese ist dafür verantwortlich, dass Raumklimadaten akquiriert werden, aus denen dann ein Modell erstellt wird, mit dem die verschiedene Raumklimaparameter vorhergesagt werden können.

Im zweiten Teil soll die Komponente *Empfehlung* entwickelt werden, welche eine Auswertungslogik besitzt, die dann darüber entscheidet, welche Maßnahmen vom Nutzer ausgeführt werden sollen. Diese sollen dem Nutzer über eine Kommandozeile vermittelt werden, um die Benutzbarkeit zu vereinfachen. Die Abbildung 4.1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau des Gesamtsystems.



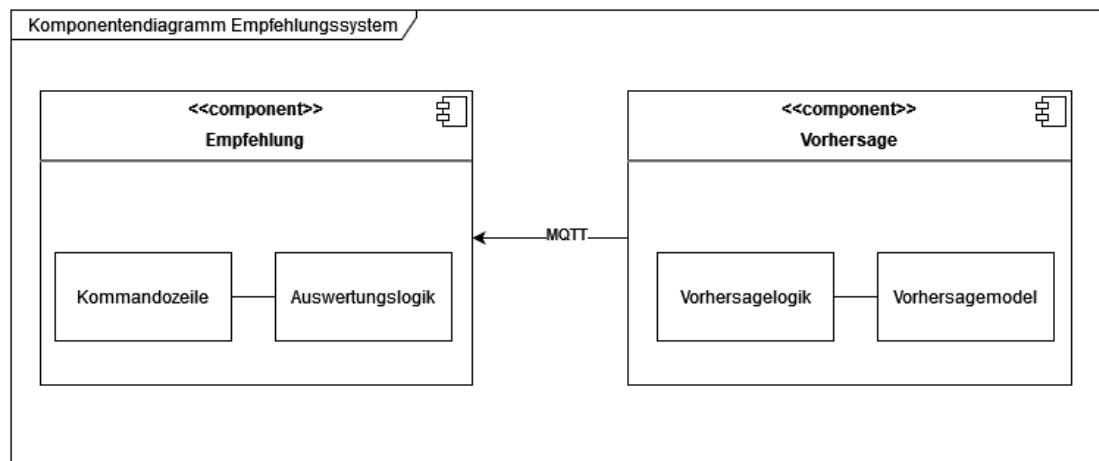


Abbildung 4.1: Komponentendiagramm des Empfehlungssystem

## 4.2 Datenakquisition

Um für die Komponente *Vorhersage* ein Vorhersagemodell zu erstellen, werden Daten benötigt, die die Raumklimaparameter historisch abbilden. Dazu müssen diese über Sensoren erfasst und gespeichert werden. Zunächst werden dafür die verwendeten Sensoren vorgestellt und anschließend ihre optimale Positionierung dieser diskutiert. Im nächsten Schritt wird die Architektur vorgestellt, die alle Komponenten miteinander verbindet.

### 4.2.1 Sensoren

Damit die Umgebung wahrgenommen werden kann, werden Sensoren benötigt, die die verschiedenen Raumklimaparameter erfassen. Es werden zu jedem Sensor die erfassten Parameter aufgezeigt und erläutert, warum sich für diesen Sensor entschieden wurde.

#### BME680

Zur Erfassung der Klimaparameter, die im Raum gemessen werden sollen, wurde sich für einen BME680 von Bosch entschieden, da dieser zur Hand war und ein breites Spektrum an Klimaparametern abdeckt. Darunter gehören die Temperatur, der Luftdruck und die Luftfeuchtigkeit. Zusätzlich lässt sich aus dem Gassensor ein CO<sub>2</sub>-Äquivalent und der VOC-Gehalt (volatile organic compounds) berechnen. Da das Rohsignal des Gassensors

auch durch andere Parameter wie z.B. die Luftfeuchtigkeit beeinflusst wird, sind dadurch auch die CO<sub>2</sub> und VOC Parameter beeinträchtigt. Vor allem der CO<sub>2</sub> Wert ist daher nicht brauchbar, da dieser zu sehr von der Luftfeuchtigkeit abhängt. Dies lässt sich deutlich in Abbildung 4.2 erkennen. Der CO<sub>2</sub>-Verlauf korreliert vor allem ab Stunde 25 sehr dem der relativen Luftfeuchtigkeit an und steigt auf eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von über 4000 ppm, was unter normalen Umständen von einer Person nicht erreicht werden kann, außer diese haucht den Sensor direkt an. Deshalb kann der CO<sub>2</sub>-Gehalt des BME680 nicht für die weitere Entwicklung des Empfehlungssystems genutzt werden.

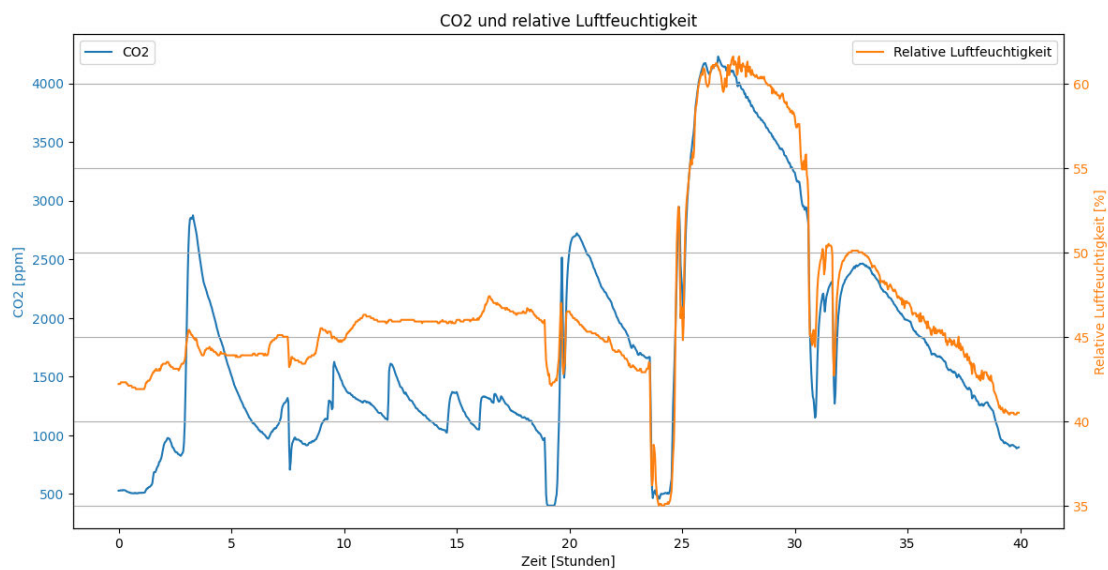


Abbildung 4.2: CO<sub>2</sub>- und relative Luftfeuchtigkeitsverlauf des BME680

### AC2M

Da der CO<sub>2</sub>-Sensor des BME680 nur ein Äquivalent berechnet und somit nur eine Schätzung ist, kann dieser Wert nicht verlässlich bewertet werden. Deshalb wird ergänzend noch ein dedizierter CO<sub>2</sub>-Sensor von TFA, der Airco2ntrol Mini, hinzugezogen. Dieser wird in der weiteren Arbeit als *AC2M* bezeichnet. Der AC2M bietet jedoch nicht direkt die Möglichkeit, die erfassten Messwerte über eine Schnittstelle auszulesen und zu speichern. Die Daten werden zwar über die USB-Schnittstelle übermittelt, sind jedoch verschlüsselt. Da die Verschlüsselung nicht besonders stark ist, gibt es dennoch die Möglichkeit, die Daten aus dem Sensor zu erhalten. Dafür wurde von den Betreuern dieser

Arbeit der Code zur Verfügung gestellt. Eine öffentliche Quelle, die dasselbe Ergebnis erzielt, lässt sich hier [2] finden.

### Reedkontakt für Tür

Um die Datenvorverarbeitung zu erleichtern und sicher festzustellen, ob ein Nutzer lüftet, wird ein Reedkontakt an der Balkontür angebracht. Der Reedkontakt ist ein elektrischer Schalter, der durch ein externes Magnetfeld aktiviert wird. Dieser wird neben der Balkontür angebracht, sodass ein passend positionierter Magnet den Schalter beim öffnen der Tür auslöst. Der ESP32 kann über die verbundenen Kabel und einen internen Pull-Up-Widerstand feststellen, ob der Reedkontakt aktiviert ist. Dadurch wird festgestellt, ob die Balkontür geschlossen ist. Die Anbringung wird in A.1 veranschaulicht.

### 4.2.2 Wetter-API

Da für die Vorhersage des Raumklimas nicht nur die aktuellen Parameter im Raum ausschlaggebend sind, sondern auch, wie das Wetter draußen ist, müssen diese Parameter zusätzlich erfasst werden. Man könnte hierfür einen zweiten Sensorknoten verwenden, der auf dem Balkon oder vor einem Fenster angebracht wird, allerdings würden hier mehr Kosten entstehen, weil ein zweiter Knoten mehr Hardware bedeutet. Um keine zusätzliche Hardware zu benutzen, wird deshalb auf eine Wetter-API zurückgegriffen, welche die notwendigen Parameter per Hypertext Transfer Protocol (HTTP)-Request liefert. Es wurde sich für die Wetter-API von „openweathermap.org“ entschieden, da diese mit 1000 Anfragen die meisten kostenlosen API-Calls zur Verfügung stellt.

### Zugriff auf die Wetter-API

Für den Zugriff auf die Wetter-API von „openweathermap.org“ ist ein Benutzerkonto nötig, um einen API-Key zu erhalten, der beim HTTP-Request mitgeschickt werden muss. Zusätzlich müssen noch die Längen- und Breitengrade bei der Anfrage angegeben werden. Eine beispielhafte Anfrage sieht folgendermaßen aus:

```
https://api.openweathermap.org/data/2.5/weather?lat=53.5483454195535&lon=10.021748387494783&appid="API-Key"&units=metric
```

Eine beispielhafte Antwort und deren Aufbau kann im Anhang unter A.2 betrachtet werden.

### 4.2.3 Positionierung der Sensoren

Die Anordnung der Sensoren, kann die Effektivität und die Qualität der Messwerte maßgeblich beeinflussen. Deshalb muss evaluiert werden, wo die optimale Position für die Sensoren innerhalb der Testumgebung ist. Es gibt keine allgemein optimale Position, stattdessen muss auf die individuelle Umgebung eingegangen werden. In Abbildung 4.3 ist einmal der Grundriss des Zimmers, das als Testumgebung genutzt wird, und wo welche Sensoren positioniert sind aufgezeigt.

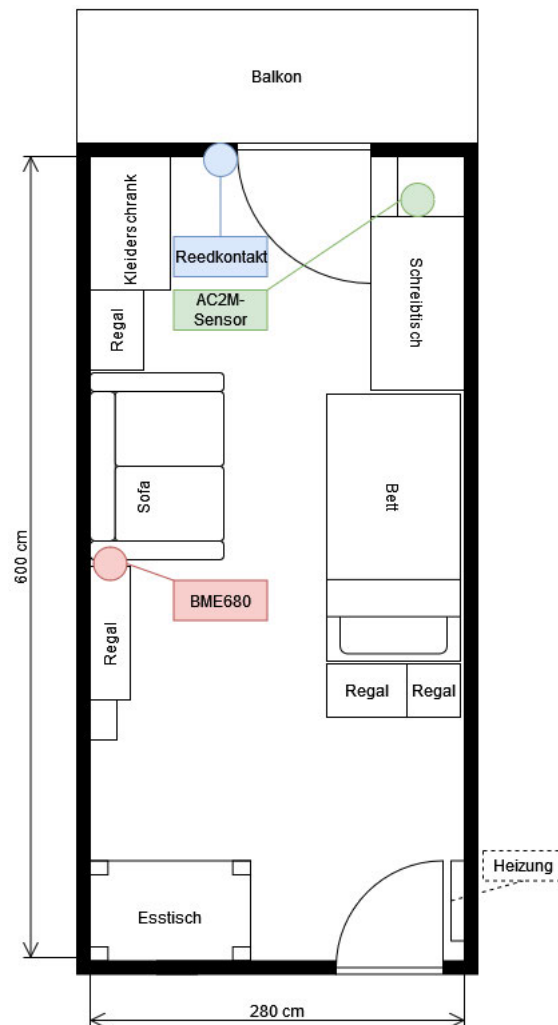


Abbildung 4.3: Positionierung der Sensoren im Raum

Der Reedkontakt stellt fest, ob die Balkontür geöffnet ist. Dieser kann an keiner anderen Position angebracht werden, da er durch seine Funktionalität neben einer Tür oder Fenster angebracht werden muss, mit dem der Raum gelüftet wird. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass die Kabelführung, nicht zu zusätzlicher Stolpergefahr führt.

Der BME680 soll die Parameter Temperatur, Luftfeuchtigkeit und VOC abdecken. Deshalb muss besonders darauf geachtet werden, dass keine Störfaktoren die Messung beeinflussen. Zu den Störfaktoren für die Temperatur gehören Wärmequellen, die sich in unmittelbarer Umgebung des Sensors befinden. Dazu gehören Lampen, Computer oder die Heizung für den Raum. Zusätzlich kann die Sonneneinstrahlung durch das Fens-

ter die Messung beeinflussen, weshalb der Sensor an einem schattigen Platz angebracht werden sollte. Da es nur einen Temperatursensor im System gibt, soll der Messwert aussagekräftig für den gesamten Raum sein. Weil der Raum beim Lüften allerdings nicht gleichmäßig abkühlt oder sich erwärmt, ist eine mittige Position zu wählen, um diesen Effekten entgegenzuwirken. Für die Luftfeuchtigkeit sollte darauf geachtet werden, dass der Sensor nicht im direkten Sichtfeld einer Person befindet und ca. 1 Meter von Schlaf- und Arbeitsplätzen entfernt ist, da die Expirationsluft einer Person eine relative Luftfeuchtigkeit von 95% besitzt [8]. Aufgrund der vorher genannten Einschränkungen wurde entschieden, den Sensor mittig im Raum, ca. 1 Meter über dem Boden zu positionieren. In unmittelbarer Umgebung befinden sich keine Wärmequellen und der Sensor ist vor Sonneneinstrahlung durch das Sofa geschützt.

Der AC2M-Sensor ist für die Messung des CO<sub>2</sub>-Gehalts zuständig. Für die Luftfeuchtigkeit gelten die gleichen Einschränkungen, wie für den BME680, da die CO<sub>2</sub>-Konzentration beim Lüften nicht gleichmäßig abnimmt und die Expirationsluft eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von 40.000 ppm besitzt. Deshalb sollte der AC2M an die gleiche Position, wie der BME680 befestigt werden. Allerdings gibt es noch einige technische Einschränkungen, die dies nicht ermöglichen. Der AC2M wird über USB an einen Raspberry Pi angeschlossen, um diesen auszulesen, der sich neben dem Schreibtisch befindet. Somit ist der AC2M nicht optimal positioniert. Es wurde jedoch darauf geachtet, dass der Sensor so weit wie möglich vom Schreibtisch entfernt steht, um die negativen Effekte einer arbeitenden Person zu minimieren.

### 4.2.4 Architektur zur Erfassung der Daten

Da nun alle Komponenten, die Daten generieren, bekannt sind, werden nun die Kommunikationskomponenten und Protokolle vorgestellt, die diese mit der Datenbank verbinden. Dies gewährleistet, dass die erfassten Daten gespeichert werden und für eine spätere Auswertung zur Verfügung stehen. Des Weiteren wird Grafana als Komponente vorgestellt, welche zur Visualisierung und Auswertung dient.

#### MessageQueuing Telemetry Transport (MQTT)

MQTT ist ein schlankes Nachrichtenprotokoll, dass sich durch eine einfache Implementierung und Zuverlässigkeit der Übertragung auszeichnet. Dabei verwendet MQTT die

Publish/Subscribe Architektur. Diese erlaubt es den Publishern, Nachrichten zu veröffentlichen, ohne direkte Kenntnis über den Empfänger (Subscriber) zu haben. Diese registrieren sich auf Topics der Publisher, um automatisch benachrichtigt zu werden, wenn eine Nachricht veröffentlicht wurde. Auf diese Weise wird eine lose Kopplung zwischen den einzelnen Komponenten gefördert. Zusätzlich bietet MQTT unterschiedliche Quality of Service Stufen an, sodass auch Geräte mit weniger Ressourcen das Protokoll nutzen können. MQTT wird zum Austausch jeglicher Daten zwischen den Komponenten genutzt, um eine lose Kopplung zu gewährleisten. Somit müssen die Komponenten nur mit dem gleichen Wireless Local Area Network (WLAN) Netzwerk verbunden sein und können unabhängig im Raum positioniert werden.

### **Node-RED**

Node-RED ist eine visuelle Programmierumgebung, die dazu genutzt wird, den Datenaustausch und die Datenflüsse zwischen verschiedenen Geräten zu vereinfachen. Dazu nutzt Node-RED Knoten, die einen Dienst oder eine Funktion darstellen und miteinander verbunden werden können, um komplexe Abläufe zu entwickeln. Es können zusätzlich leicht neue Knoten und Schnittstellen hinzugefügt werden, um den Datenfluss individuell gestalten zu können. Node-RED wurde zur Datenzusammenführung ausgewählt, da es sowohl eine Schnittstelle für MQTT und InfluxDB unterstützt und auch die Wetter-API über eine HTTP-Request Schnittstelle direkt eingebunden werden kann. In Abbildung 4.4 ist der Aufbau der Komponenten dargestellt. Dabei werden die Datenquellen, also der Sensorknoten, der AC2M und die Wetter-API, eingebunden, die Daten aufbereitet, sodass diese in der Datenbank gespeichert werden können und die Berechnung der absoluten Feuchtigkeit vorgenommen. Somit orchestriert Node-RED den Datenerhebungsprozess, indem es alle Sensoren und externen Datenquellen miteinander verbindet und den Fluss der Daten zwischen den Komponenten verwaltet.

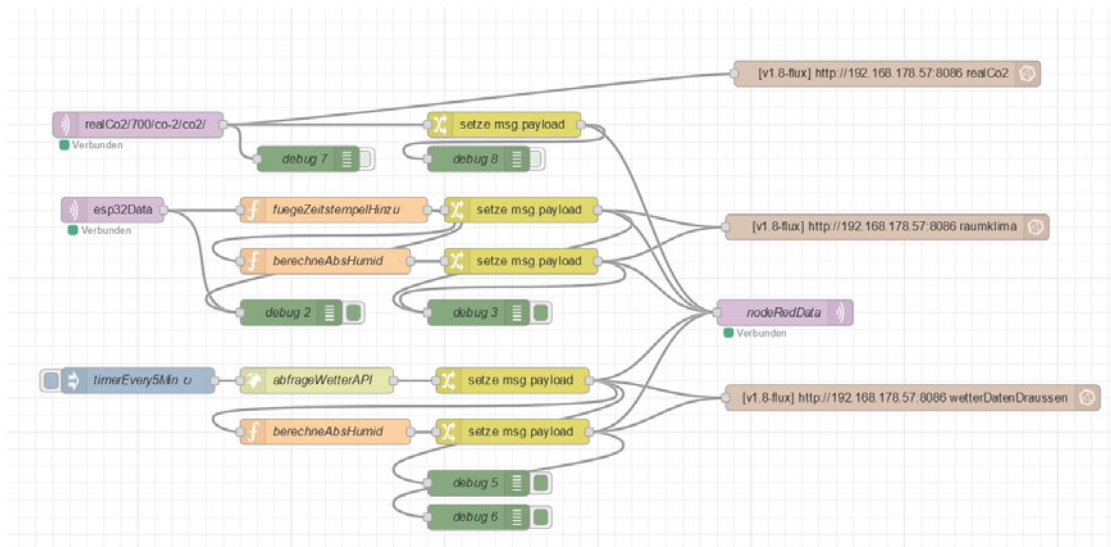


Abbildung 4.4: Implementierung des Node-RED Grafens

### InfluxDB

InfluxDB ist eine Datenbank, die speziell für das Speichern von Zeitreihendaten optimiert ist und eignet sich somit besonders gut für Sensorüberwachungs- und IoT-Anwendungen. Zusätzlich ist sie darauf ausgelegt, große Datenmengen zu verarbeiten.

### Grafana

Grafana ist eine Plattform zur Visualisierung und Analyse von Zeitreihen. Dabei ermöglicht Grafana das Erstellen von Dashboards, auf denen Daten aus unterschiedlichen Quellen dargestellt werden können. Auch wenn Grafana nicht direkt für die Datenerfassung notwendig ist, bietet es für die spätere Datenanalyse einen guten ersten Überblick über die Daten und kann zur Erkennung von Zusammenhängen genutzt werden. Es können so alle Daten überblickt werden und durch verschiedene Visualisierungen Erkenntnisse gezogen werden. Des Weiteren bietet Grafana eine einfache Möglichkeit, Daten aus verschiedenen Quellen in einem Datensatz herunterzuladen, was für die Auswahl und Auswertung der Datensätze von Vorteil ist.



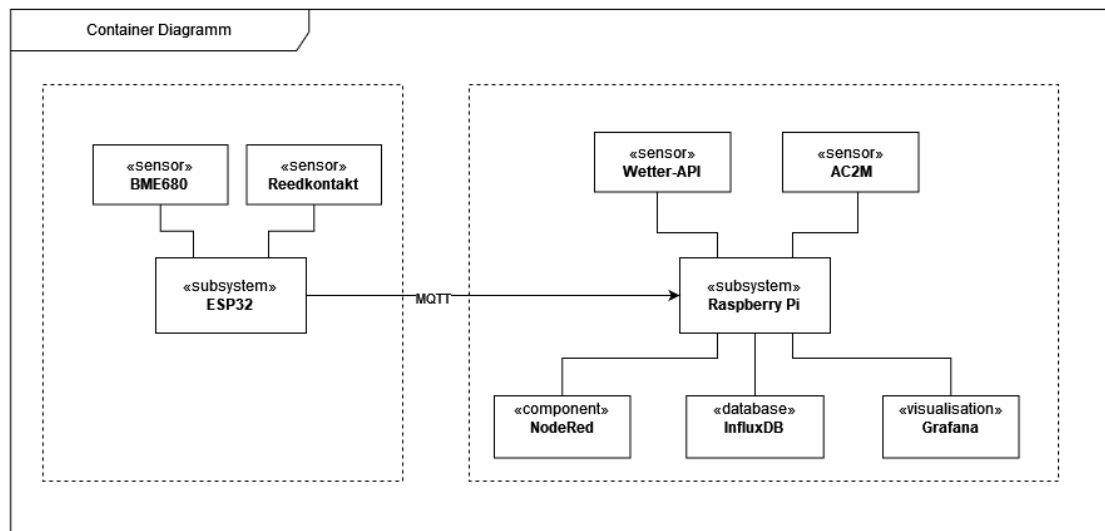


Abbildung 4.5: Container-Diagramm der Datenerfassung

Die Abbildung 4.5 zeigt die Verknüpfung der einzelnen Komponenten, die für die Datenerfassung benötigt werden. Dabei bildet ein Raspberry Pi die Hauptplattform, um die Wetter-API und den AC2M-Sensor zu integrieren und die weiteren Komponenten, wie Node-RED, Grafana oder die Influx-Datenbank bereitzustellen. Diese bilden ein Model, View, Controller (MVC)-Pattern, bei dem Node-RED der *Controller*, die InfluxDB das *Model* und Grafana die *View* ist. Des Weiteren wird über das MQTT-Protokoll eine Verbindung zum ESP32 hergestellt, der die Datenerfassung für den BME680 und den Reedkontakt übernimmt. Damit dient der Raspberry Pi als zentrale Hardware-Plattform, um die erhobenen Daten zu sammeln, integrieren, speichern und zu visualisieren. In Abbildung 4.6 wird gezeigt, wie die einzelnen Komponenten auf dem Raspberry Pi deployt sind. Dabei werden Node-RED und Grafana in einem separaten Docker-Container bereitgestellt, da so kein neues Docker-Image erstellt werden musste und die Datenbank InfluxDB wird nativ ausgeführt.

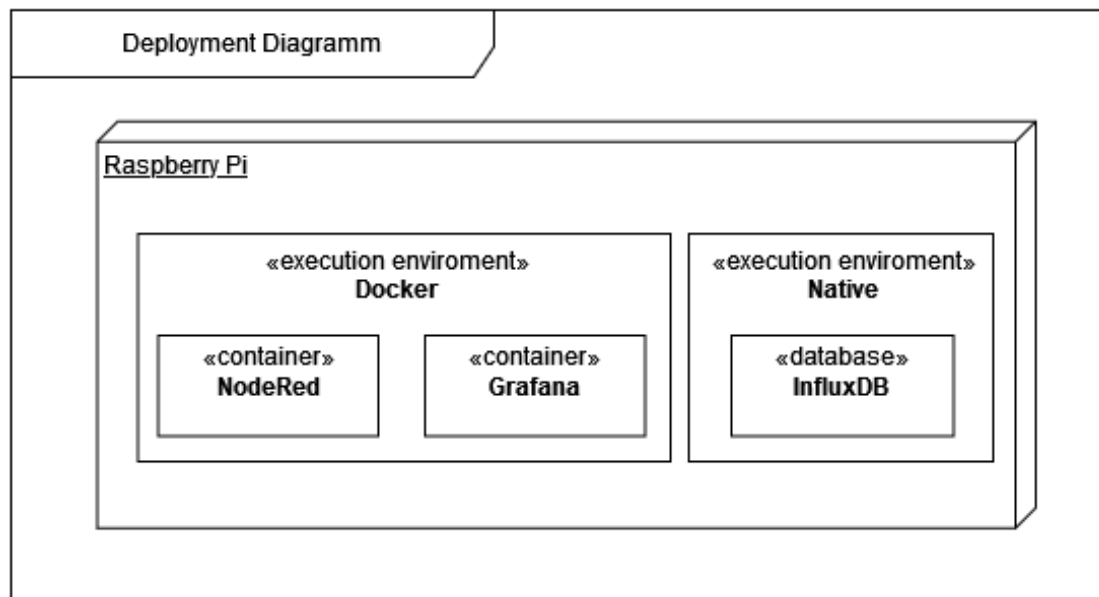


Abbildung 4.6: Deployment-Diagramm auf dem Raspberry Pi

### 4.3 Implementierung des Sensorknotens

Um die Daten des BME680 und des Reedkontakts zu erfassen, wird ein Mikrocontroller benötigt, der diese ausliest und die Messwerte per MQTT an Node-RED schickt, damit diese in der Datenbank gespeichert werden können. Es wurde hierfür ein ESP32 verwendet, da dieser recht günstig ist und die benötigten Schnittstellen wie W-LAN besitzt und eine Bibliothek verfügbar ist, um den BME680 auszulesen. Zusätzlich sind und die nötigen Hardwarepins vorhanden, um den BME680 und den Reedkontakt anzuschließen. Der Reedkontakt wird über ein einfaches *digitalRead(Pin)* ausgelesen. Dabei ist darauf zu achten, dass der Pin, an dem der Reedkontakt angeschlossen ist, mit einem internen Pull-up-Widerstand konfiguriert wird, sonst lässt sich der Reedkontakt nicht auslesen. Der BME680 benötigt, sobald er gestartet wurde, eine gewisse Zeit, bis dieser sich selbst kalibriert hat. Bis die Kalibrierung abgeschlossen ist, werden keine Daten veröffentlicht. Danach wird eine einfache Schleife ausgeführt, die die einzelnen Messwerte ausliest und alle 5 Sekunden per MQTT veröffentlicht.

### 4.4 Datenvorverarbeitung

Damit aus den erhobenen Daten ein Modell für die Vorhersage entstehen kann, wird im ersten Schritt ein Überblick über die erhobenen Daten gegeben und deren Relevanz für das Empfehlungssystem bewertet. Im nächsten Schritt wird gezeigt, wie die Daten zur Modellbildung ausgewählt werden.

#### 4.4.1 Überblick über die erhobenen Daten

Um die Daten sinnvoll zu verarbeiten, muss zuerst einen Überblick über die erhobenen Daten verschaffen werden, um die Aussagekraft für das Empfehlungssystem zu bewerten. Dafür wird im folgenden Abschnitt jeder Raumklimaparameter einzeln über die Zeit betrachtet, um seine Aussagekraft zu bewerten. In den Abbildungen werden die Daten über einen Zeitraum von etwa acht Monaten dargestellt. In dieser Zeit wurde nicht nach einem System gelüftet, sondern nach persönlichem Wohlbefinden des Bewohners.

#### Luftdruck

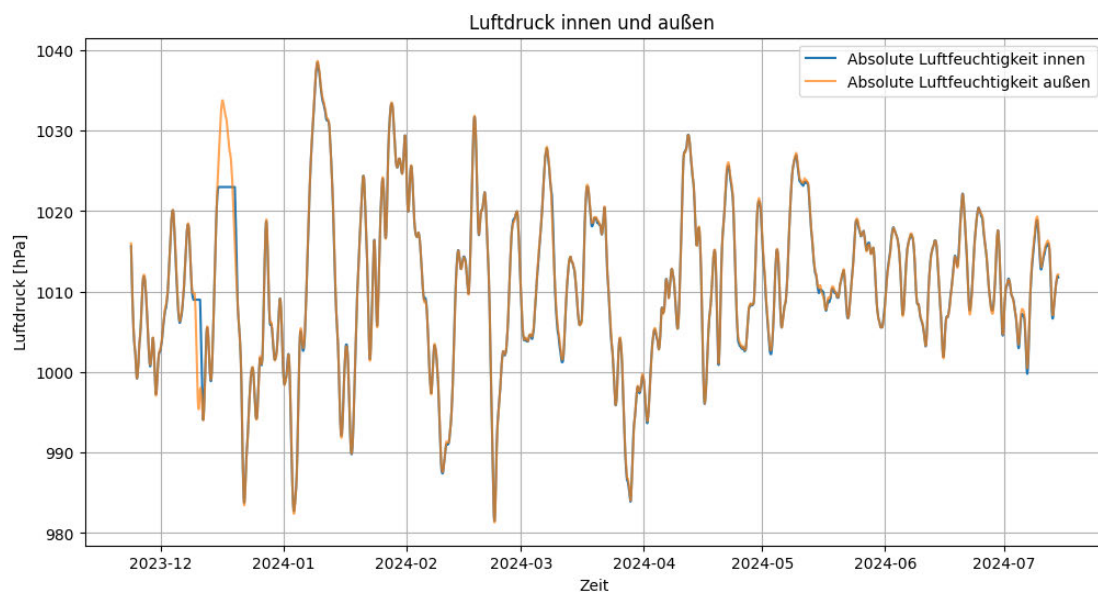


Abbildung 4.7: Luftdruckverlauf innen und außen

In der Abbildung 4.7 erkennt man, dass sich beiden Kurven des Luftdrucks überlagern, was darauf hindeutet, dass keine großen Unterschiede zwischen dem Außen- und Innen- druck bestehen. Kleinere Abweichungen können über unterschiedliche Höhen der Senso- ren entstehen. Daher lässt sich über den Luftdruck nicht feststellen, ob eine Tür oder ein Fenster geöffnet ist. Somit ist die weitere Betrachtung des Luftdrucks für das Empfeh- lungssystem nicht relevant.

### VOC

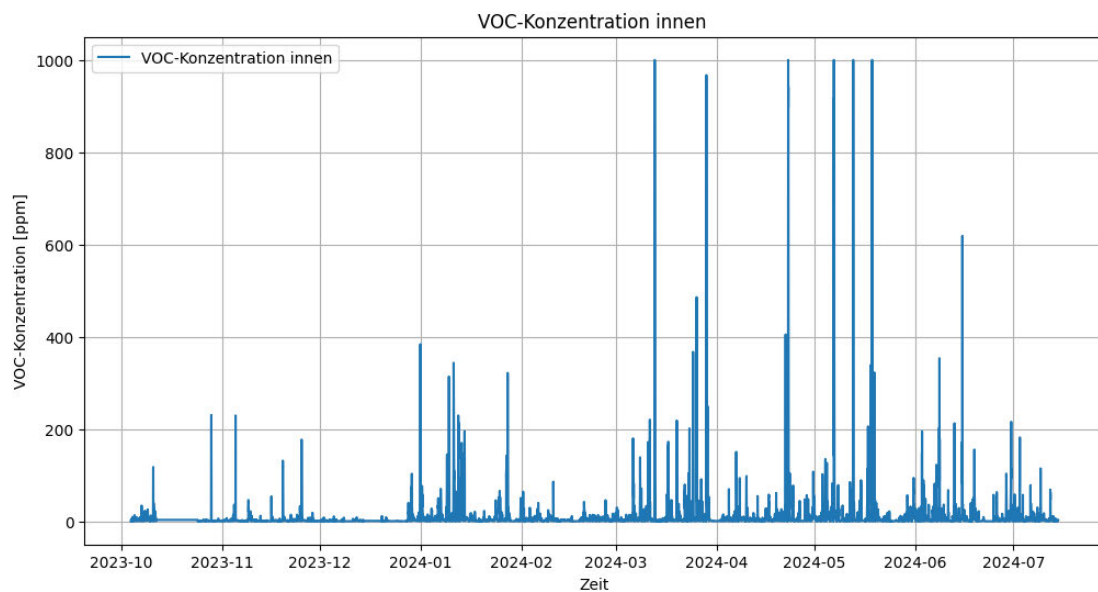


Abbildung 4.8: VOC-Verlauf innen

In der Abbildung 4.8 sieht man einen grundsätzlich konstanten Verlauf mit einigen star- ken Ausschlägen, was darauf hindeutet, dass in der Wohnung etwas gekocht, bzw. ange- braten wurde. Dabei überschreiten die Ausschläge, die in 2.1 beschriebenen Grenzwerte deutlich.

### CO<sub>2</sub>

Die Abbildung 4.9 zeigt einen typischen CO<sub>2</sub>-Verlauf über zwei Wochen. Dabei kann festgestellt werden, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration selten über 900 ppm steigt. Es lassen sich

zusätzlich abrupte Abfälle erkennen, die auf ein Lüften hindeuten, und in Abbildung 4.10 lässt sich ein langsam abfallender Verlauf erkennen, der nicht durch Lüften entstanden ist, sondern durch die Abwesenheit des Benutzers. Zusätzlich lässt sich hier erkennen, wann der Nutzer wieder nach Hause gekommen ist.

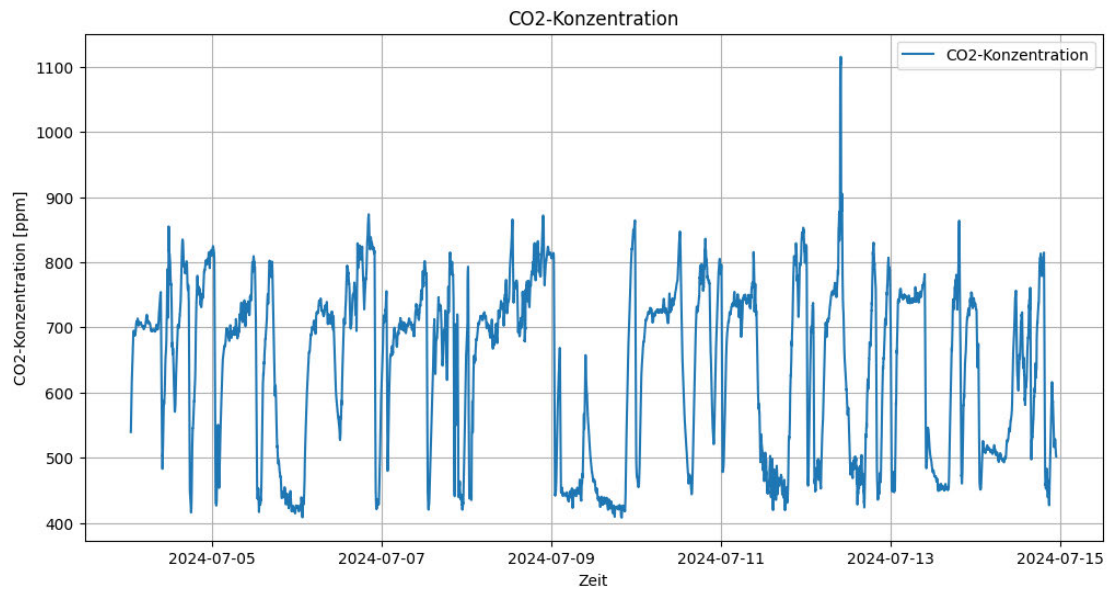


Abbildung 4.9: Exemplarischer CO<sub>2</sub>-Verlauf über zwei Wochen

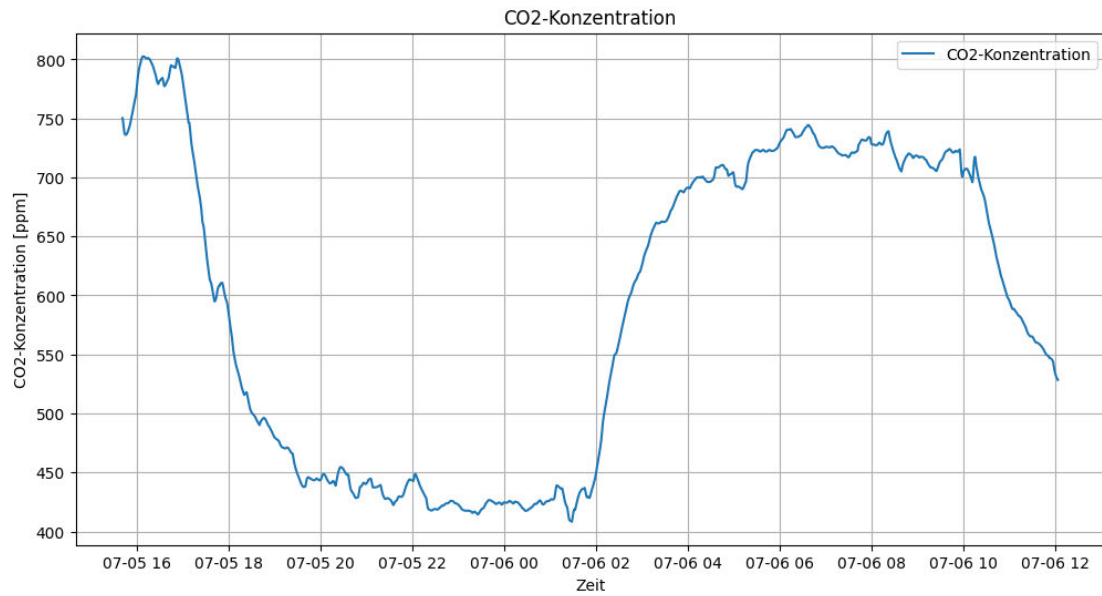


Abbildung 4.10: Exemplarischer CO<sub>2</sub>-Verlauf bei Abwesenheit und Ankunft des Bewohners

#### Temperatur

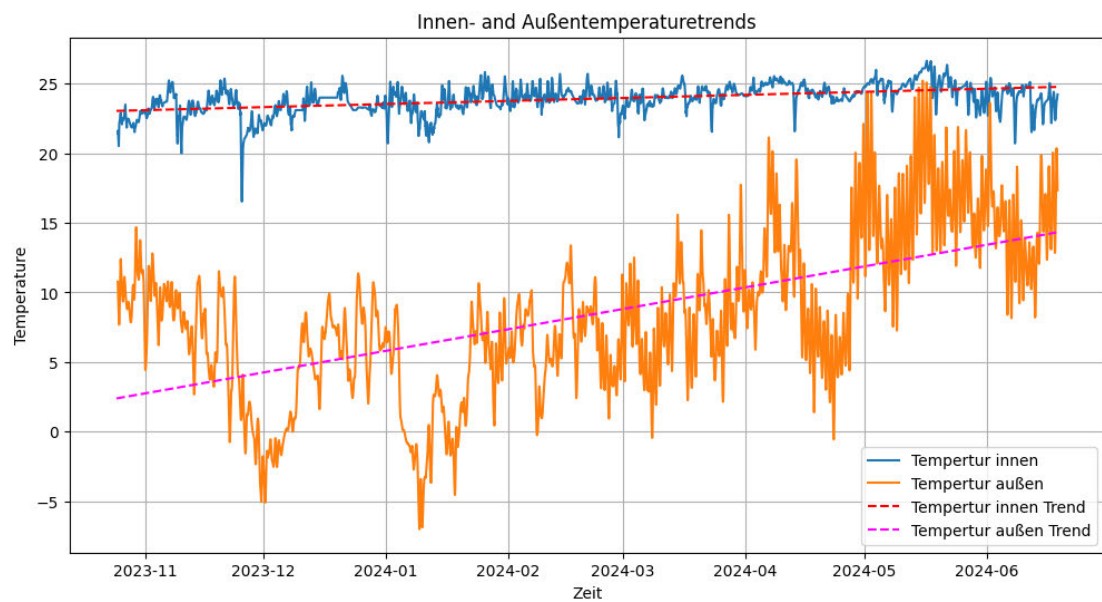


Abbildung 4.11: Temperaturverlauf innen und außen

Bei der Temperaturkurve von außen lässt sich in Abbildung 4.11 ein klar steigender Trend von den Wintermonaten zu den Sommermonaten erkennen. Außerdem lässt sich Abbildung 4.12 ein klarer Tag - Nacht Zyklus erkennen.

Bei der Temperaturkurve von innen lässt sich eine recht konstante Temperatur erkennen, mit einer durchschnittlichen Temperatur von 23.9 °C. Zusätzlich herauszustellen ist, dass die Innentemperatur nicht stark von der Außentemperatur beeinflusst wird. Sowohl bei warmen als auch bei kalten Außentemperaturen blieb die Innentemperatur gleich, was auf eine gute Wärmedämmung des Gebäudes zurückzuführen ist. In Abbildung 4.13 lässt sich ein normaler Temperaturverlauf beim Lüften erkennen. Diese Beobachtung ist relevant für das Empfehlungssystem, da sie zeigt, dass die Innentemperatur durch ein Lüften bei entsprechender Außentemperatur gesenkt werden kann. Zusätzlich kann in Abbildung 4.14 anhand des Anstiegs der Temperatur festgestellt werden, wann eine Person nach Abwesenheit nach Hause kommt.

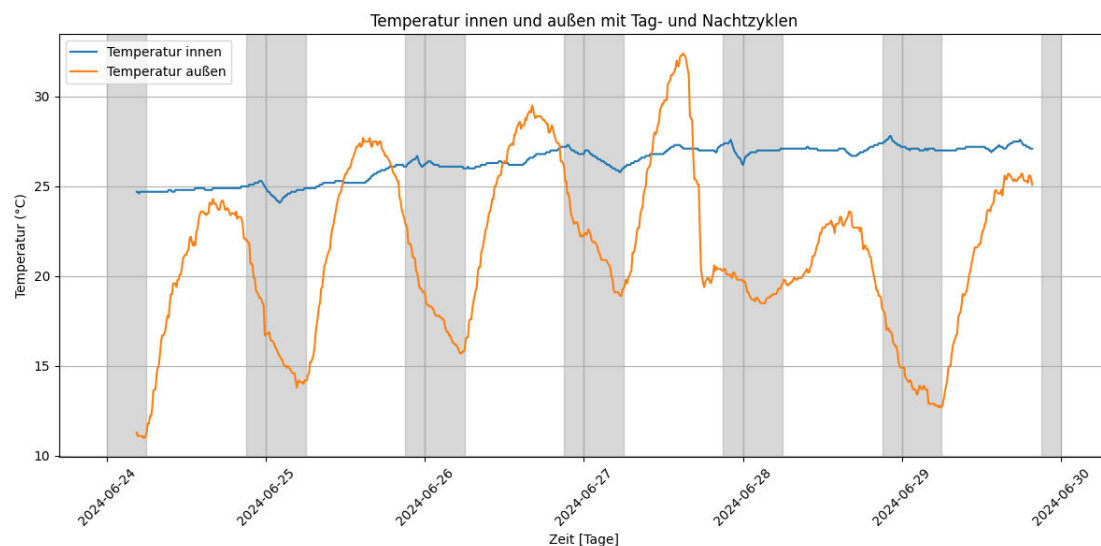


Abbildung 4.12: Temperaturverlauf Tag - Nacht Zyklus

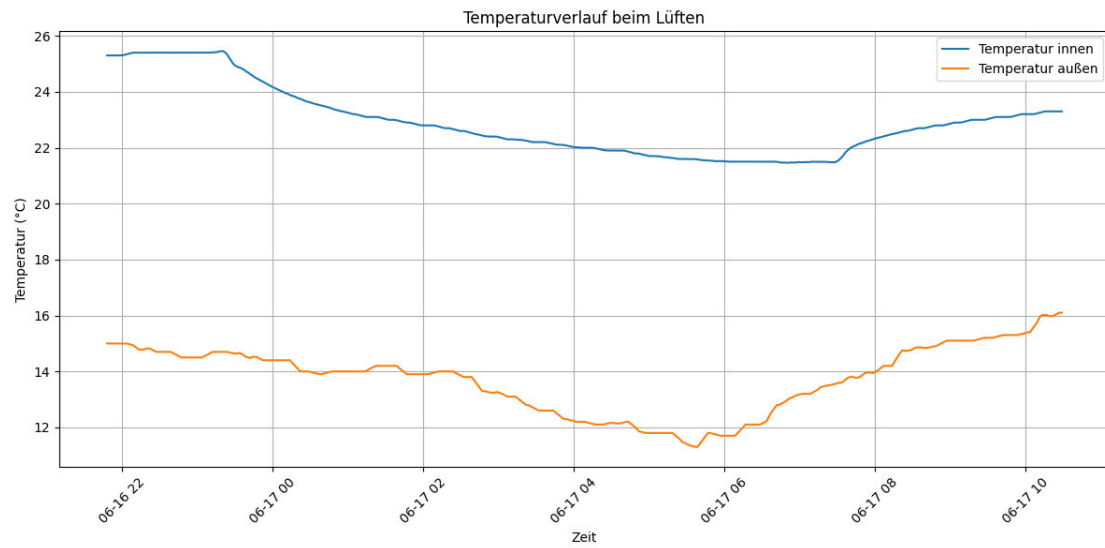


Abbildung 4.13: Temperaturverlauf beim Lüften

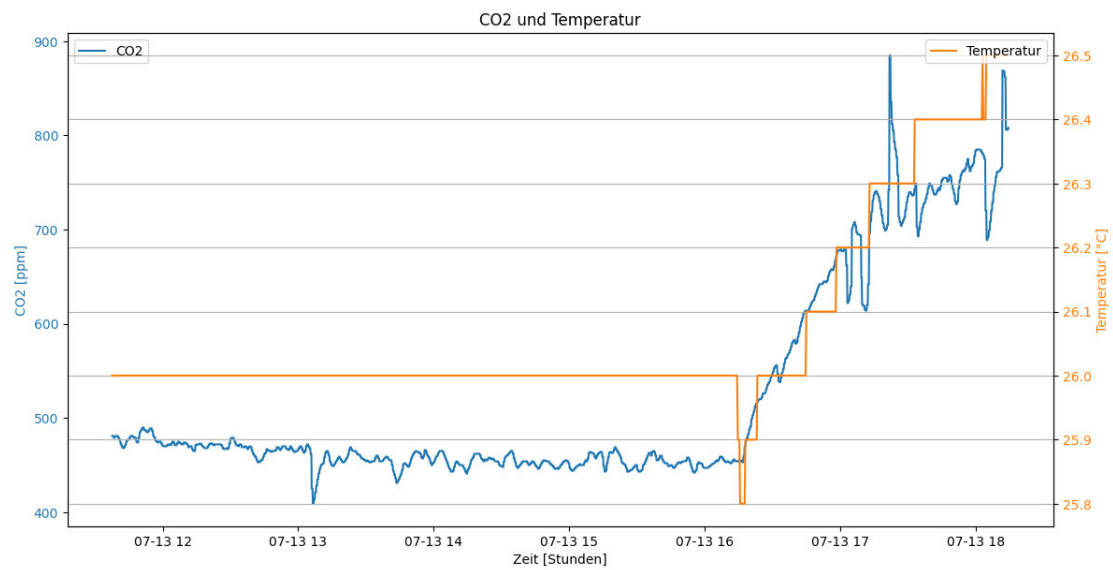


Abbildung 4.14: Temperatur- und CO<sub>2</sub>-Verlauf innen, wenn Person nach Hause kommt



### Absolute Luftfeuchtigkeit

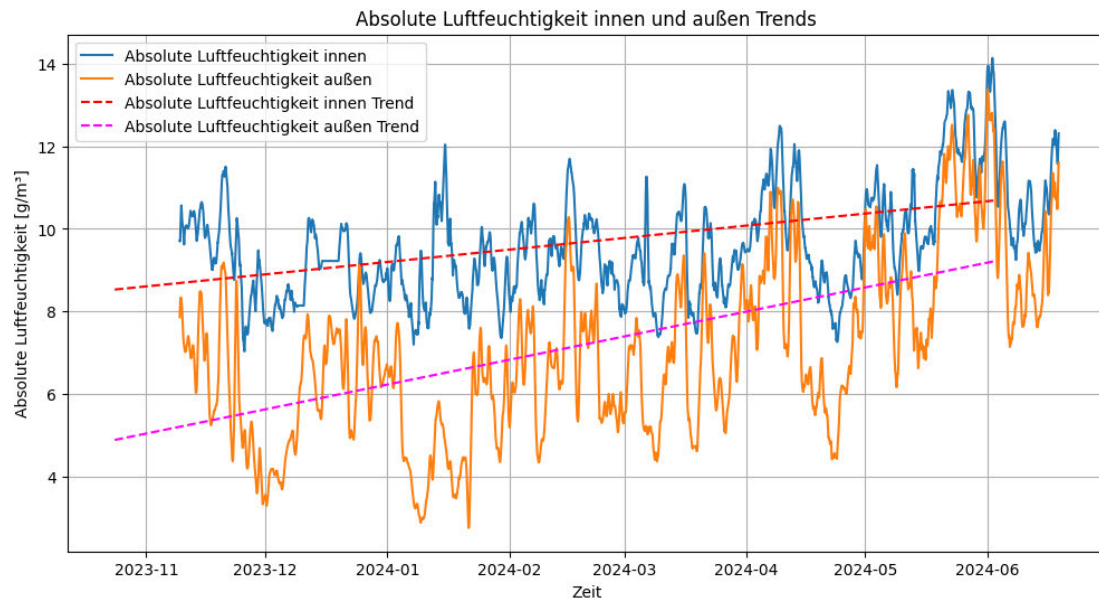


Abbildung 4.15: Absolute Luftfeuchtigkeitsverlauf innen und außen

Man erkennt in der Abbildung 4.15, dass die absolute Luftfeuchtigkeit innen grundsätzlich dem Verlauf von Draußen folgt, jedoch die absolute Luftfeuchtigkeit innen höher ist. Des Weiteren lässt sich erkennen, dass es wie bei der Temperatur Ausschläge nach unten gibt, die wieder ein Lüften indizieren. Zusätzlich gibt es einige große Ausschläge nach oben, die in Abbildung 4.17 beispielhaft dargestellt sind. Diese weisen darauf hin, dass dort Wäsche im Raum getrocknet oder in der Wohnung geduscht wurde. Grundsätzlich lässt sich, wie in Abbildung 4.16 erkennen, dass die absolute Luftfeuchtigkeit innen der von außen folgt, während die absolute Luftfeuchtigkeit im Gebäude aber immer höher ist.

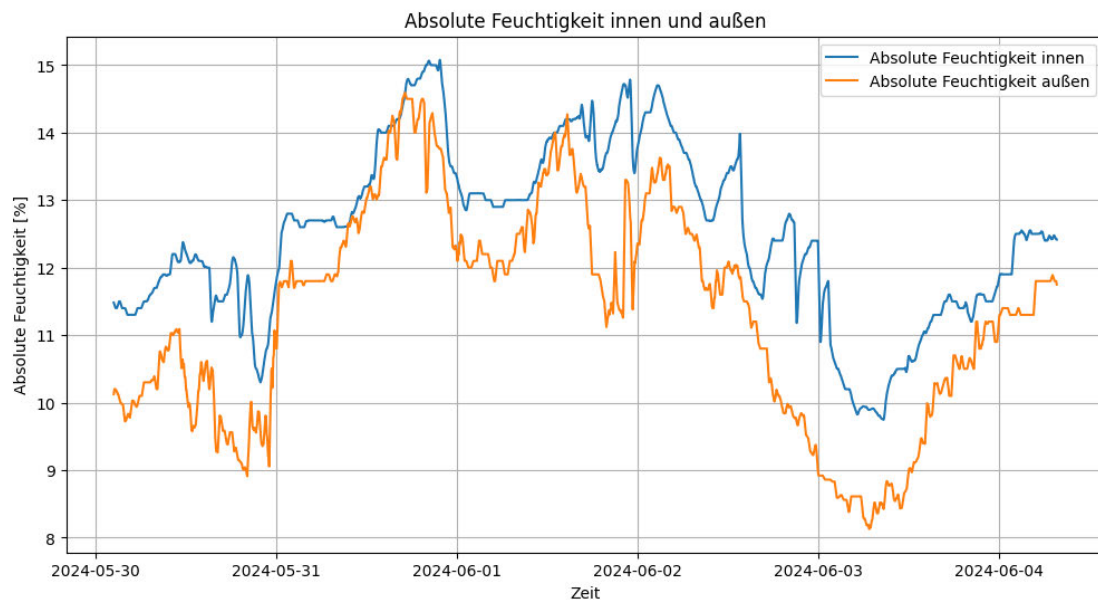


Abbildung 4.16: Absolute Luftfeuchtigkeit innen und außen

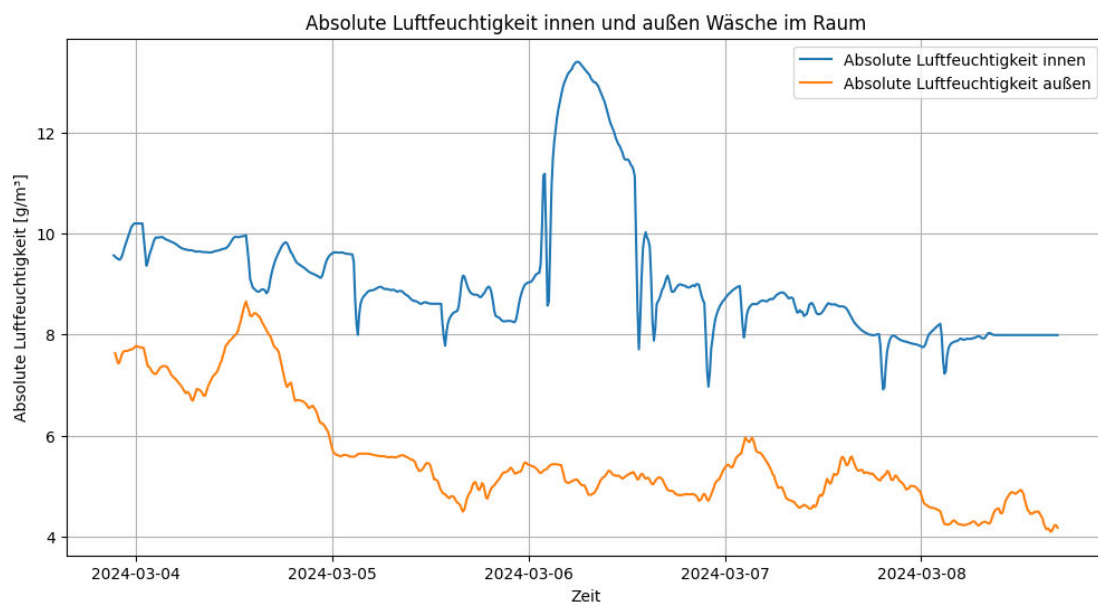


Abbildung 4.17: Absolute Luftfeuchtigkeitsverlauf bei Wäsche im Zimmer

## Relative Luftfeuchtigkeit

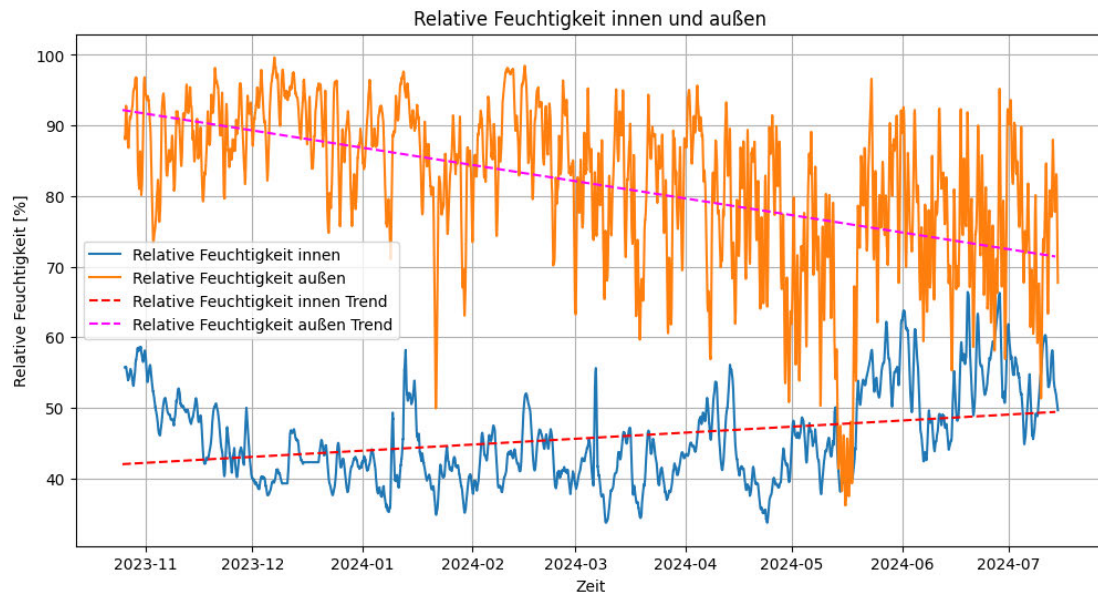


Abbildung 4.18: Relative Luftfeuchtigkeitsverlauf innen und außen

In Abbildung 4.18 sieht man, dass die relative Luftfeuchtigkeit im Innenraum in den Wintermonaten zwischen 30 % und 60 % liegt. Diese steigt in den Sommermonaten deutlich an und liegt zwischen 40 % und 70 %. Im Gegensatz zu Abbildung 4.15 ist die relative Luftfeuchtigkeit in den Wintermonaten außen immer höher als innen. Dort liegt die relative Feuchtigkeit zwischen 70 % und 100 %.

### 4.4.2 Auswertung der Datensätze zur Modellbildung

Grundsätzlich birgt die Datenerfassung das Problem, dass die Daten nicht systematisch erhoben wurden, sondern im Alltag, und somit keine wiederholbaren Messungen durchgeführt wurden. Da die erhobenen Daten nicht direkt für das Vorhersagemodell genutzt werden können, müssen diese angepasst werden. Dabei bildet die Datenvorverarbeitung die Grundlage für die spätere Datenanalyse und beeinflusst diese maßgeblich in Hinsicht auf Qualität und Aussagekraft. Dabei müssen im ersten Schritt passende Datensätze ausgewählt werden. Ein Datensatz entspricht in diesem Fall einem gemessenen Verlauf eines Parameters, sobald gelüftet wird. Dieser Schritt wird händisch in Grafana vorgenommen, da eine Automatisierung dieses Prozesses den Umfang der Arbeit überschreiten würde.

Bei der Auswahl der Datensätze muss darauf geachtet werden, dass die Messung lang genug ist, damit eine gewisse Aussagekraft gewährleistet ist. In der Regel sollte die Messung eine Dauer von mindestens 15 Minuten umfassen, damit Trends in der Messung zu identifizieren sind. Darüber hinaus ist es wichtig sicherzustellen, dass bei der Auswahl eine möglichst breite Vielfalt von Parametern abgedeckt wird. So wäre es beispielsweise bei Temperaturverläufen nicht sinnvoll, nur Datensätze zu benutzen, bei der die Außentemperatur nicht variiert, da so kein breites Spektrum abgebildet werden kann. Grafana hilft aber auch noch bei weiteren Aspekten. So kann der Zeitabstand zwischen den Messpunkten eingestellt werden und was passieren soll, wenn Datenpunkte fehlen.

Als Nächstes müssen die verschiedenen Datensätze zu einem großen Datensatz zusammengeführt werden, damit darauf die Datenanalyse durchgeführt werden kann. Dazu müssen alle Datensätze die gleiche Länge aufweisen und jeder Datensatz muss den gleichen Index erhalten, da alle Datensätze im Modell parallel angezeigt werden müssen. Die Abbildung 4.19 visualisiert diesen Prozess als Pipeline:

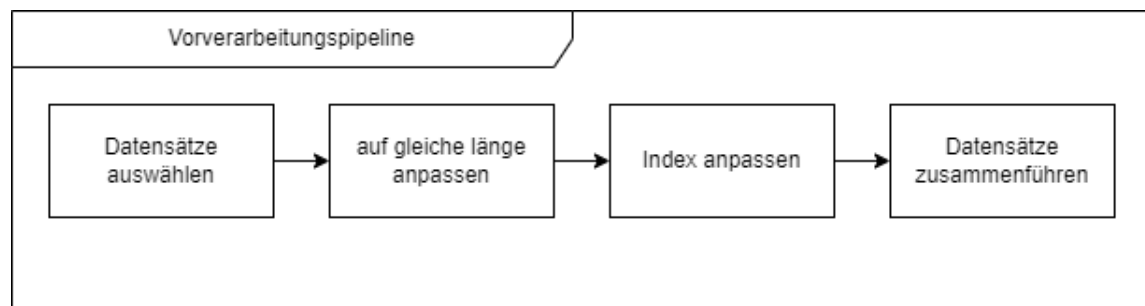


Abbildung 4.19: Pipeline zur Datenvorverarbeitung

## 4.5 Vorhersagemodell

Da das Empfehlungssystem entscheiden soll, wann ein guter Zeitpunkt zum Lüften ist, muss dieses erstmal bestimmen, wie sich Lüften zum aktuellen Zeitpunkt auf das Gesamtsystem auswirken wird. Es muss also eine Vorhersage getroffen werden, die einen möglichen Temperaturverlauf für die nächsten 15 Minuten vorhersagt, anhand dessen werden kann, ob der Zeitpunkt zum Lüften günstig ist. Da eine vollständige modellhafte Abbildung des Raums, die alle seine Eigenschaften enthält, im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist, muss ein Modell gebildet werden, dass das System anhand realer Messwerte abbildet und zum treffen einer Vorhersage verwendet werden kann.

### 4.5.1 Polynom Interpolation

Da nicht jede Innentemperatur mit jeder Außentemperaturkombination oder Luftfeuchtigkeit beim Lüften des Raums gemessen werden kann, muss zwischen den realen Datenpunkten interpoliert werden. Dazu kann das Verfahren der örtlichen Interpolation genutzt werden. Dieses Verfahren wird normalerweise verwendet, um eine Schätzung zwischen bekannten Werten in räumlicher Abhängigkeit durchzuführen. So kann eine Schätzung über ein Untersuchungsgebiet getätigt werden, obwohl nur Stichproben-Messungen vorliegen. Das Interpolationsverfahren basiert auf der grundlegenden Annahme, dass Messpunkte, die räumlich nahe beieinander liegen, tendenziell ähnliche Werte aufweisen, als Punkte, die räumlich weiter voneinander entfernt sind. Um diese Interpolation durchzuführen, wird mit räumlich kontinuierlich variierenden Ebenen gearbeitet, die über eine Polynomregression erstellt werden können. Dabei werden die Koeffizienten des Polynoms einer krümmungsruckfreien Ebene, so angepasst, dass alle Messpunkte Funktionswerte dieses Polynoms sind.

Das zu entwickelnde Modell weicht von dieser Annahme ab, da hier keine räumlich abhängigen Punkte betrachtet werden, sondern zeitlich und von einer externen Einflussgröße abhängige Werte genutzt werden, um die Zielvariable zu schätzen. Diese externen Einflussgrößen beziehen sich hierbei auf die Raumklimaparameter wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und CO<sub>2</sub>-Konzentration. Für ein Polynom erster Ordnung sieht das Modell folgendermaßen aus.

$$Z(X, Y) = \beta_0 + \beta_1 \cdot X + \beta_2 \cdot Y$$

mit

$$Z(X, Y) = \text{Wert im Inneren zum Zeitpunkt und Außenwert}(X, Y)$$

$$\beta_0 = \text{Regressionskonstante}$$

$$\beta_i = \text{Regressionskoeffizienten}$$

Es wird die Polynomregression beispielhaft an der Vorhersage von Temperaturverläufen gezeigt. Dabei wurde ein Polynom 3. Grades verwendet, das den besten Kompromiss nach der Methode der kleinsten Quadrate und dem logischen Zusammenhang des Kontextes liefert. Ein Polynom 5. Grades weist zwar einen besseren Determinationskoeffizient auf,

jedoch „wackelt“ die Ebene nur noch zwischen den erhobenen Verläufen hin und her, was im Kontext keinen Sinn ergibt. Die Abbildung 4.20 zeigt auf der x-Achse die Zeit

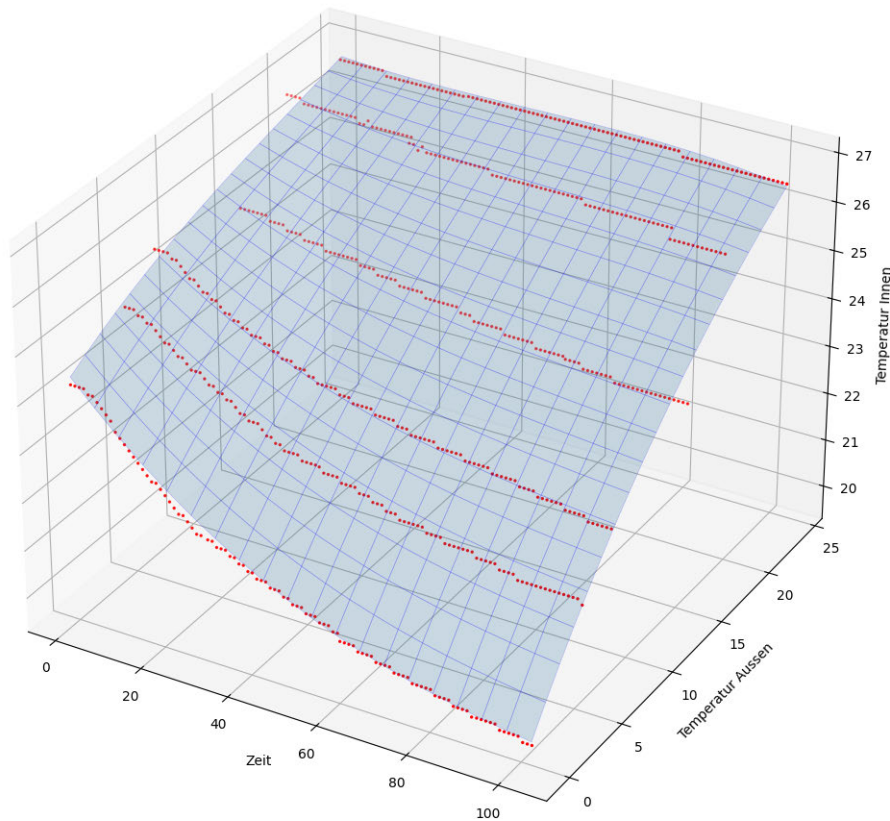


Abbildung 4.20: Polynomregression über Temperaturverläufe

in diskreten Schritten, auf der y-Achse die Außentemperatur und auf der z-Achse die Innentemperatur. Die rot eingezeichneten Verläufe sind gemessene Temperaturwerte zu unterschiedlichen Außentemperaturen. Die blaue Gitterebene ist die Polynomfläche, die durch die Temperaturverläufe gelegt wurde. Somit sind die Bereiche der Polynomfläche zwischen den gemessenen Temperaturverläufen die Interpolation, die genutzt werden kann, um für beliebige Außen- und Innentemperaturen einen Verlauf vorherzusagen. Dazu müssen die aktuellen Temperaturen in das Polynom eingefügt und Zeitwerte inkrementiert werden. Der sich daraus ergebene Verlauf ist eine Simulation dessen, was passiert, wenn gelüftet wird.

### 4.5.2 Architektur zur Vorhersage

Die Vorhersage soll aus den aktuellen Raumklimaparametern und den zuvor über die Polynomregression entwickelten Modellen eine Simulation erstellen, auf die die Empfehlungskomponente zugreifen kann, um dann auszuwerten, ob es sinnvoll ist zu Lüften oder das Fenster zu schließen. Die Simulation ist in diesem Fall nicht dynamisch, da die zeitliche Abhängigkeit schon im Vorhersagemodell auf der x-Achse enthalten ist. Somit ist kein Durchlauf der Simulation notwendig. Um den Aspekt der Erweiterbarkeit aufzugreifen, werden die einzelnen Modelle bei der Vorhersage unabhängig voneinander betrachtet. Somit ist ein leichter Austausch der Modelle möglich.

Der Koordinator liest bei seiner Initialisierung zuerst alle gespeicherten Modelle ein und erhält danach regelmäßig den aktuellen Zustand der Raumklimaparameter über die Komponente Node-RED. Für jeden aktuellen Zustand erstellt der Koordinator aus den Modellen eine Lookup-Tabelle für jeden Raumklimaparameter. Diese wird im nächsten Schritt an die Empfehlungskomponente geschickt, die dann die Auswertung vornimmt.

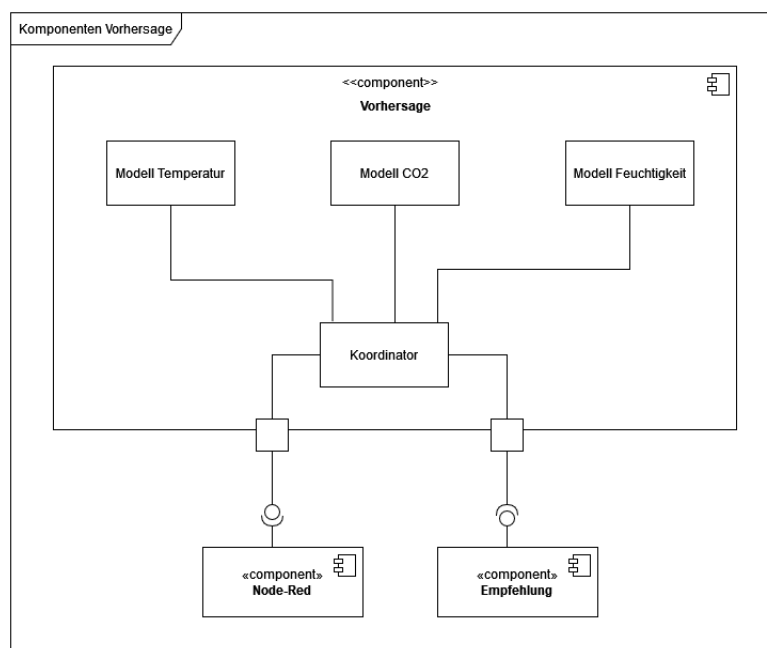


Abbildung 4.21: Komponentendiagramm Vorhersage

### Aufbau der Vorhersagemodelle

Das Vorhersagemodell besteht grundsätzlich aus einem Namen, aus dem mathematischen Modell und dessen Koeffizienten. Zusätzlich muss noch angegeben werden, welchen Gültigkeitsbereich das Vorhersagemodell abdeckt. Dies wird über Minimal- und Maximalwerte für jede Achse umgesetzt. Zusätzlich ist noch die Zeit gespeichert, welche zwischen den einzelnen Schritten der Zeitachse vergangen ist, um später errechnen zu können, nach welcher Zeit welches Ergebnis eintritt. Für das Speichern und Laden des Modells wurde das JavaScript Object Notation (JSON)-Format gewählt, da es eine einfache Möglichkeit bietet, Daten strukturiert zu speichern und zu übertragen. Ein beispielhaftes Modell ist im Folgenden veranschaulicht.

```
{
  "type": "temperature",
  "model": "C[0]*1 + C[1]*X + C[2]*Y + C[3]*X^2 + C[4]*X*Y +
C[5]*Y^2 + C[6]*X^3 + C[7]*X^2*Y + C[8]*X*Y^2 + C[9]*Y^3",
  "coefficients": [
    24.610840001683435,
    -0.09436217642583562,
    0.16006359857200728,
    0.0006506913820346809,
    0.004431803913641153,
    -0.00501634550035944,
    -1.6087851415630405e-06,
    -1.8168549719827648e-05,
    -3.4840655081312503e-05,
    8.64839721249303e-05
  ],
  "R2": 0.960441102768335,
  "PolynomialDegree": 3,
  "stepSizeSek": 10,
  "minX": 1,
  "maxX": 103,
  "minY": -0.36,
  "maxY": 24.0,
  "minZ": 19.8,
```



```
"maxZ": 26.8  
}
```

Es wurde jeweils für die Temperatur, die CO<sub>2</sub>-Konzentration und die absolute Feuchtigkeit ein Vorhersagemodell erstellt. Für die relative Feuchtigkeit wurde kein Modell erstellt, da dies bereits über die absolute Feuchtigkeit abgedeckt ist. Ebenfalls wurde für die VOCs kein Modell erstellt, da es in der Datengrundlage nicht ausreichend Datensätze gab, aus denen ein Modell erstellt werden konnte. Hier muss in der Empfehlungskomponente ein Abstrich gemacht werden und auf einen einfachen Grenzwert zurückgegriffen werden, der darüber entscheidet, ob gelüftet werden soll.

### 4.5.3 Ausführung einer Simulation

Eine Simulation dient als ein Werkzeug zur Nachbildung realer Systeme durch mathematische Modelle. Um zu verstehen, wie eine Simulation mit einem Vorhersagemodell durchgeführt wird, muss man die Struktur eines Modells betrachten. Auf der x-Achse ist stets die Zeit dargestellt. Dabei repräsentiert  $x = 0$  immer den Zeitpunkt, an dem das Lüften begonnen wurde. Ein Zeitpunkt in der Zukunft wird durch positive x-Werte dargestellt. Eine Vorhersage besteht somit aus dem Inkrementieren der Zeitwerte zu den passenden Innen- und Außenparametern. Es muss zunächst jedoch der richtige x-Wert mit den Innen- und Außenparametern bestimmt werden, um den Startwert für eine Vorhersage zu finden. Dazu wird das Newton-Raphson-Verfahren benutzt, um die Lösung der Polynomgleichung iterativ zu berechnen, die die Beziehung zwischen den Parametern beschreibt. Hierbei wird nicht eine Nullstelle, sondern ein spezifischer Wert auf einer Polynomfläche gesucht, der den gegebenen Bedingungen entspricht.

#### Das Newton-Raphson-Verfahren

Das Newton-Raphson-Verfahren ist ein weit verbreitetes iteratives Verfahren zur Lösung von nicht-linearen Gleichungen. Die ursprüngliche Entwicklung bezog sich auf das Finden von Nullstellen, jedoch kann das Verfahren auch auf andere Probleme angewandt werden, wie in diesem Fall das Bestimmen eines Wertes auf einer Ebene, die durch ein Polynom definiert ist. Die Idee des Newton-Raphson-Verfahrens ist, für eine Funktion  $f(x)$  eine

Nullstelle zu finden. D.h. es sucht einen  $x$  Wert, für den gilt  $f(x) = 0$ . Man startet mit initialem Startwert  $x_0$  für eine Nullstelle und erhält mit  $x_1$  eine bessere Annäherung[7].

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$$

Der Prozess wird wiederholt als

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

Da allerdings in diesem Fall nicht direkt die Nullstelle gesucht wird, sondern das Ziel ist, den entsprechenden  $X$ -Wert für die gegebenen  $Y$ - und  $Z$ -Werte zu finden, muss das Verfahren angepasst werden, um diese Funktion zu erfüllen. Die im Modell gespeicherte Funktion hat die Form  $z = f(x, y)$ . Die Anpassung, dass das Newton-Raphson-Verfahren angewandt werden kann, sieht wie folgt aus:

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0, y) - z}{f'(x_0, y)}$$

Diese Anpassung ist notwendig, da der  $X$ -Wert gesucht wird, der an der Stelle  $f(x) = f(x_0, y) - z = 0$  ergibt. Genau dann ergibt der  $X$ -Wert mit dem gegebenen  $Y$ -Wert  $Z$ . Somit ist der Startwert für die Vorhersage gefunden und es kann wie in 4.5.3 beschrieben mit der Simulation fortgefahren werden.

#### 4.5.4 Verifikation der Vorhersage

Da ein Modell erstmal nur eine Abbildung der Wirklichkeit ist, muss noch überprüft werden, inwieweit das Modell dieser entspricht. Um nun die Modelle zur Vorhersage der verschiedenen Raumklimaparameter zu überprüfen, werden aus den erhobenen Daten Datenreihen ausgewählt und mit der jeweiligen Vorhersage verglichen. Die jeweiligen Startparameter werden dem Modell gegeben, um eine Vorhersage zu treffen. Diese sollte dann dem vorher ausgewählten Verlauf entsprechen. Es wurde versucht, ein breites Spektrum an verschiedenen Startparametern auszuwählen, um das Modell unter vielfältigen und repräsentativen Bedingungen zu testen und dessen Robustheit sicherzustellen. Die ausgewählten Daten entsprechen nicht den Daten, welche für die Erstellung des Modells

benutzt wurden, um hier eine In-Sample Evaluation auszuschließen. Diese Methode gibt Aufschluss darüber, wie gut das Modell mit unbekannten Daten umgehen kann.

### Temperatur

Man erkennt Abbildung in 4.22 bis 4.26, dass die Temperaturvorhersage grundsätzlich eine gute Fähigkeit besitzt, die allgemeine Tendenz der Temperaturabnahme vorherzusagen. Es lässt sich jedoch feststellen, dass die Genauigkeit, mit der die Vorhersage getroffen werden kann, mit der Außentemperatur variiert. Die besten Ergebnisse werden bei mittleren und niedrigen Außentemperaturen erzielt, siehe Abbildung 4.22 und 4.24. Es ist jedoch ersichtlich, dass vor allem bei höheren Temperaturen, wie in Abbildung 4.26 erkennbar, die Vorhersage keine genaue Temperatur, sondern nur einen gewissen Trend vorhersagen kann. Diese Ungenauigkeit lässt sich zum Teil vernachlässigen, da sich bei höheren Außentemperaturen die Komforttemperatur, die in 2.1 definiert ist, nicht erreichen lässt und es somit besser wäre, nicht zu lüften.

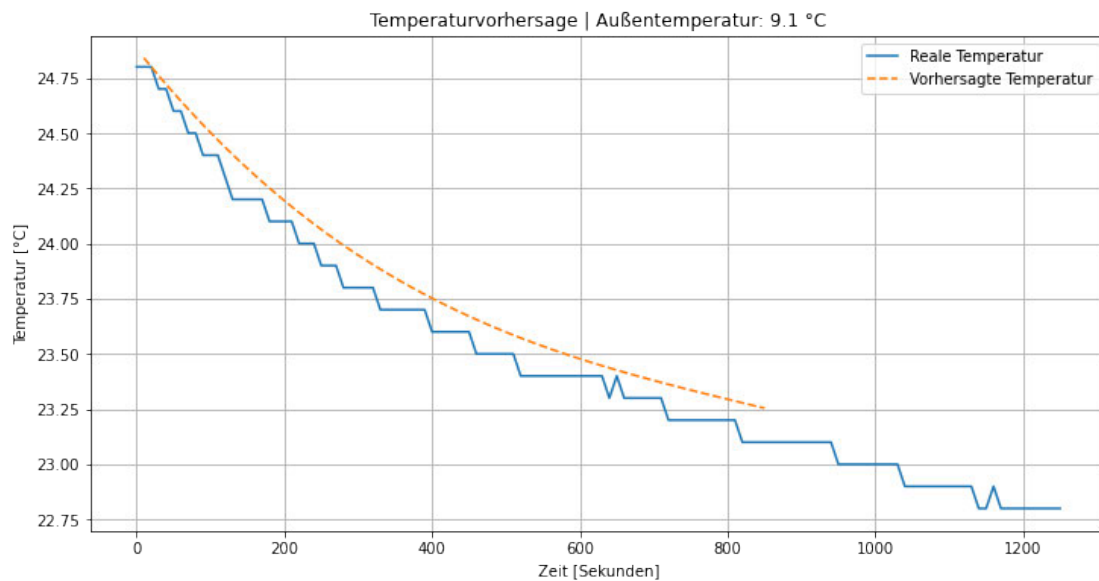


Abbildung 4.22: Außentemperatur 9.1 °C

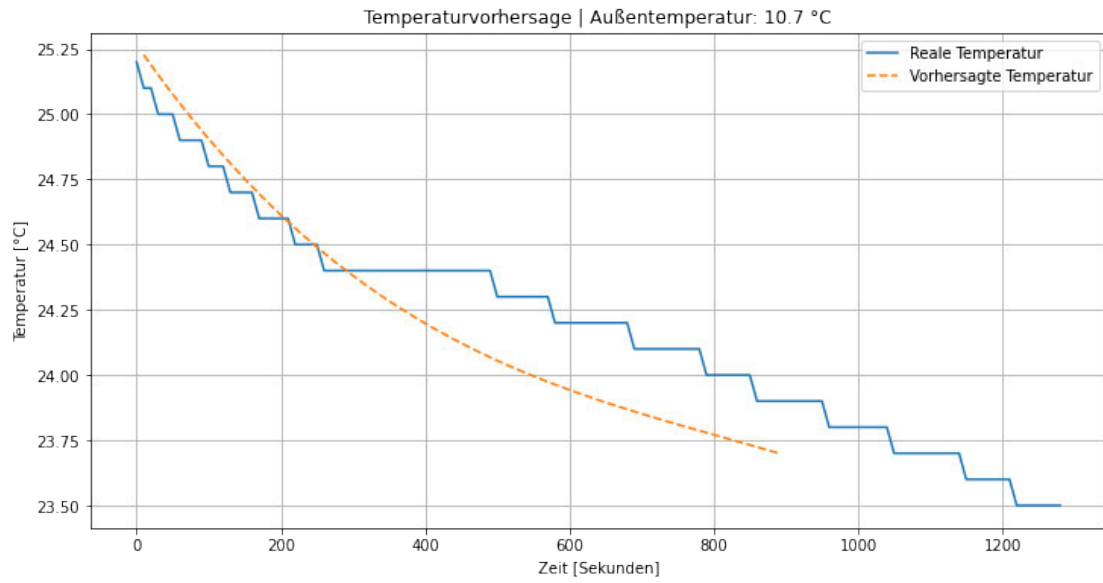


Abbildung 4.23: Außentemperatur 10.7 °C

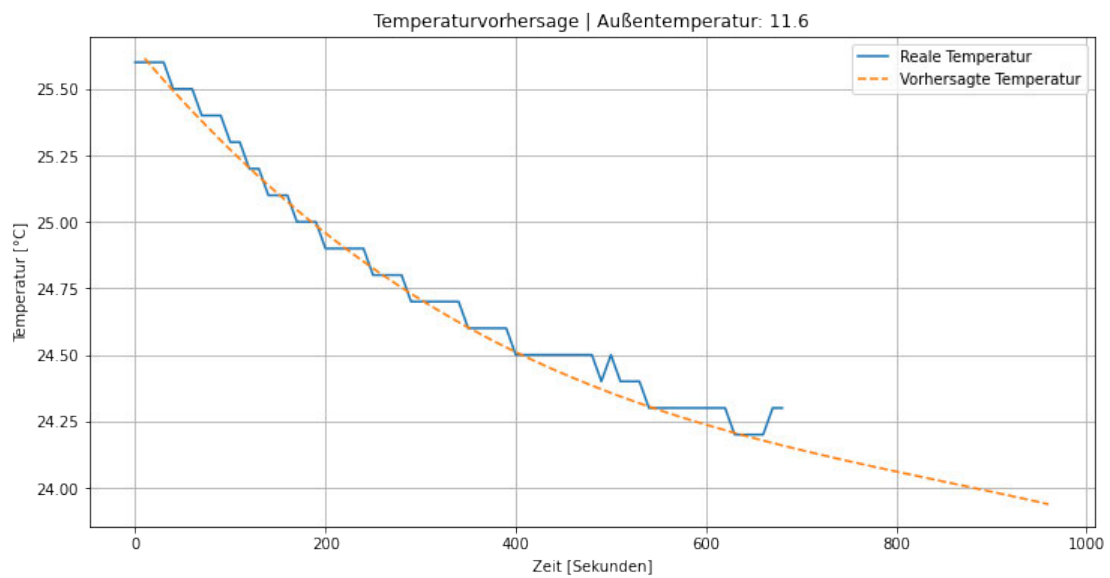


Abbildung 4.24: Außentemperatur 11.6 °C

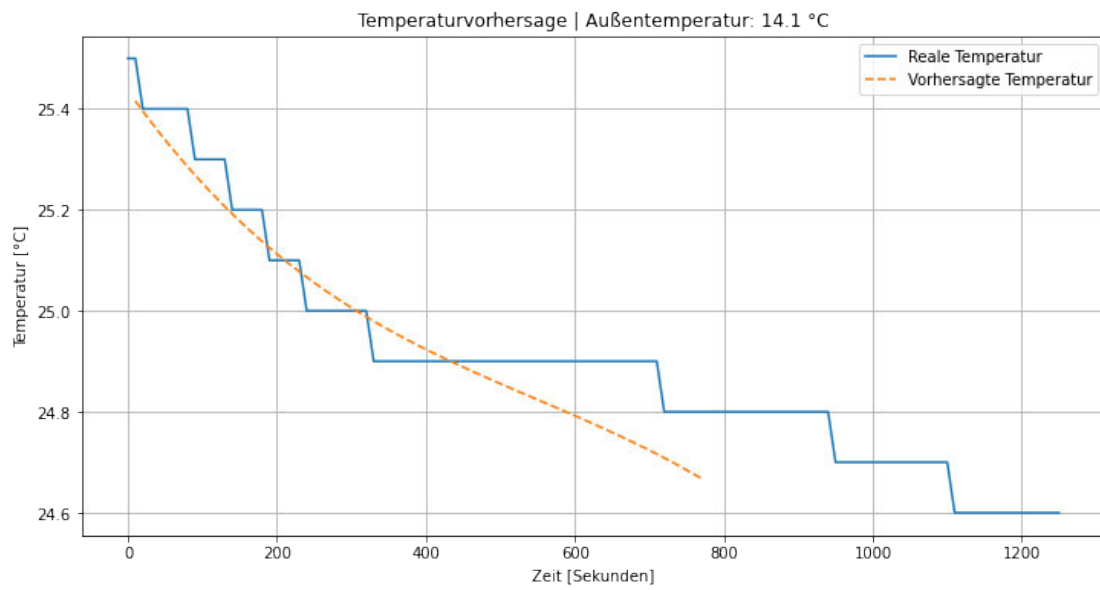


Abbildung 4.25: Außentemperatur 14.1 °C

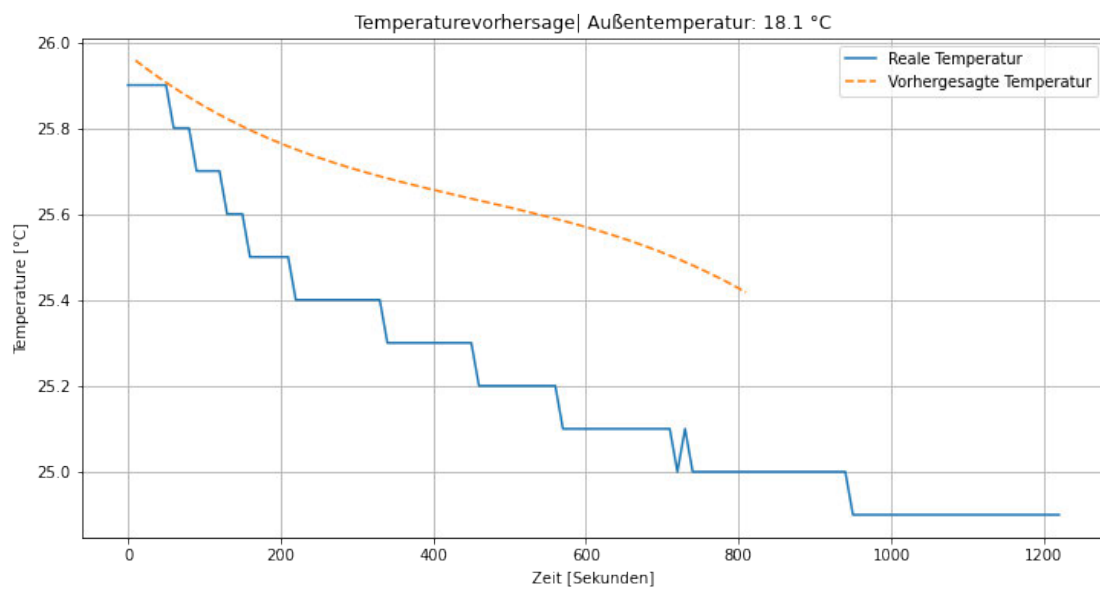


Abbildung 4.26: Außentemperatur 18.1 °C

### CO<sub>2</sub>

In Abbildung 4.27 sieht man, dass die Vorhersage den ersten Abfall des realen Verlaufs ganz gut vorhersagt, jedoch ab einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von ca. 550 ppm den steilen Abfall nicht mehr abbildet. Der Endwert der Vorhersage passt jedoch wieder ganz gut mit minimaler Abweichung zum realen Wert von etwa 20 ppm.

In Abbildung 4.28 ist zu erkennen, dass die Vorhersage einen deutlich stärkeren Abfall vorhersagt, als er real auftritt. Dabei weisen die Endwerte der Vorhersage auch einen unterschied zum realen Verlauf auf. Es fällt auf, dass eine kleine Änderung beim Startwert recht große Auswirkungen auf die Genauigkeit der Vorhersage hat. Dies kann durch externe Faktoren beeinflusst werden, wie, ob sich eine Person in der Nähe des Sensors befindet und deshalb die ausgeatmete Luft noch einen Faktor bei der Messung spielt oder die Außentemperatur einen Einfluss auf die Luftaustauschrate vom Raum hat. Grundsätzlich kann jedoch der ungefähre Trend des CO<sub>2</sub>-Verlaufs vorhergesagt werden und somit für das Empfehlungssystem genutzt werden.

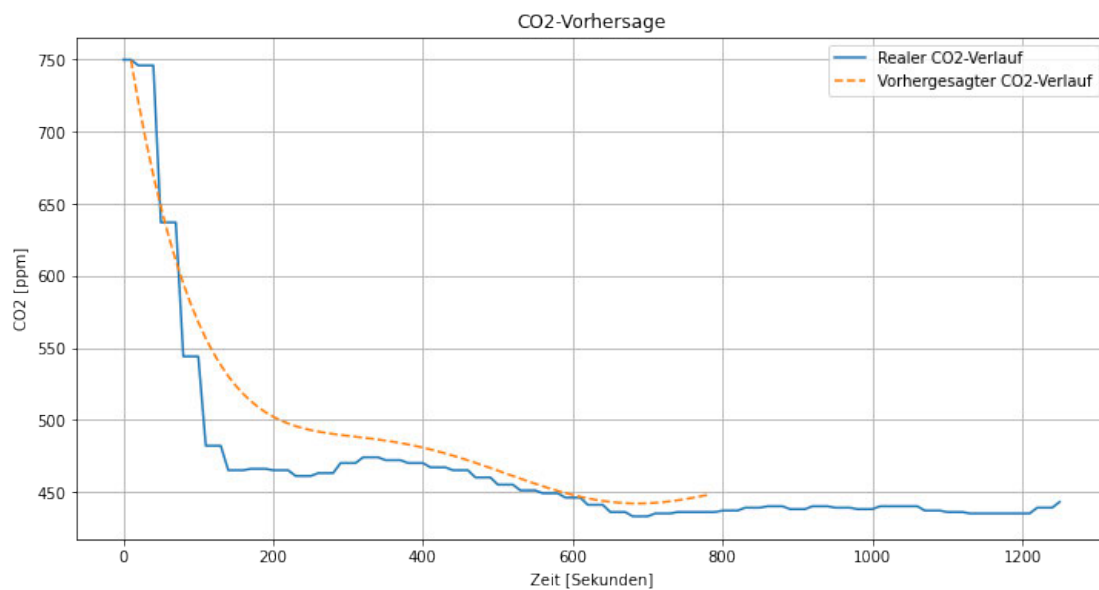


Abbildung 4.27: CO<sub>2</sub>-Vorhersage und realer Verlauf

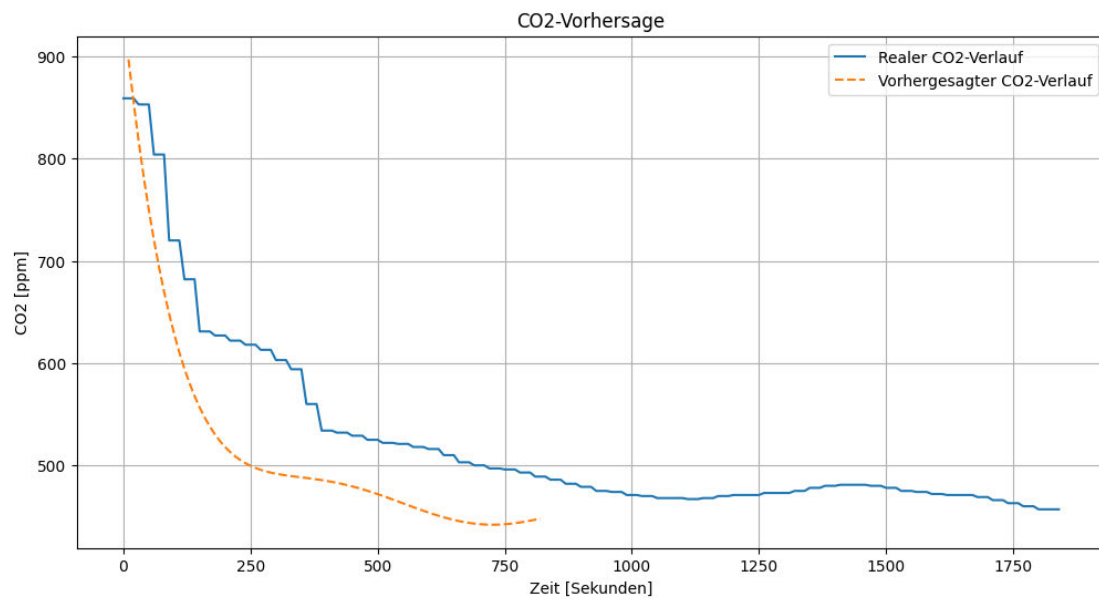


Abbildung 4.28: CO<sub>2</sub>-Vorhersage und realer Verlauf

### Absolute Feuchtigkeit

Das Vorhersagemodell der absoluten Feuchtigkeit zeigt im Vergleich mit den anderen Modellen die schlechteste Vorhersagefähigkeit. Es lässt sich zwar in den Abbildungen 4.29 und 4.30 eine passable Vorhersage erkennen, jedoch liegen die Vorhersagen sowohl in Abbildung 4.31 als auch in Abbildungen 4.32 und 4.33 völlig daneben, was Zielwert und Abnahme des Abfalls angeht. Zusätzlich fällt bei den Abbildungen 4.32 und 4.33, auf, dass, obwohl die absolute Feuchtigkeit von außen sehr nahe beieinander liegt, die kleine Veränderung des Startwertes von 12.5 g/m<sup>3</sup> auf 11.1 g/m<sup>3</sup> eine große Wirkung auf die Eigenschaften der Vorhersagekurve hat.

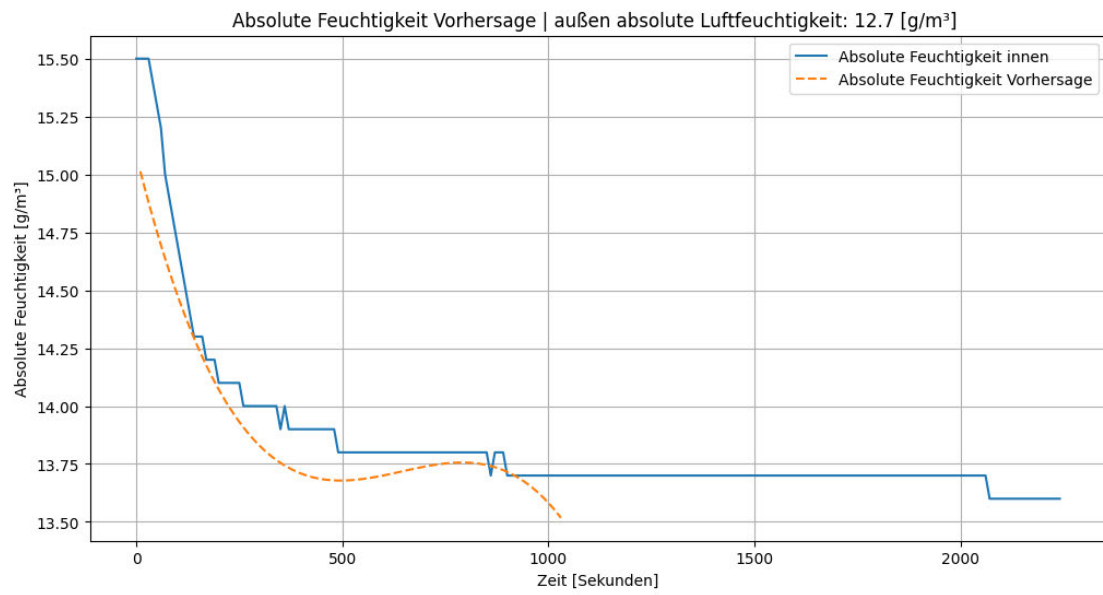


Abbildung 4.29: Absolute Feuchtigkeit außen 12.7 g/m<sup>3</sup>

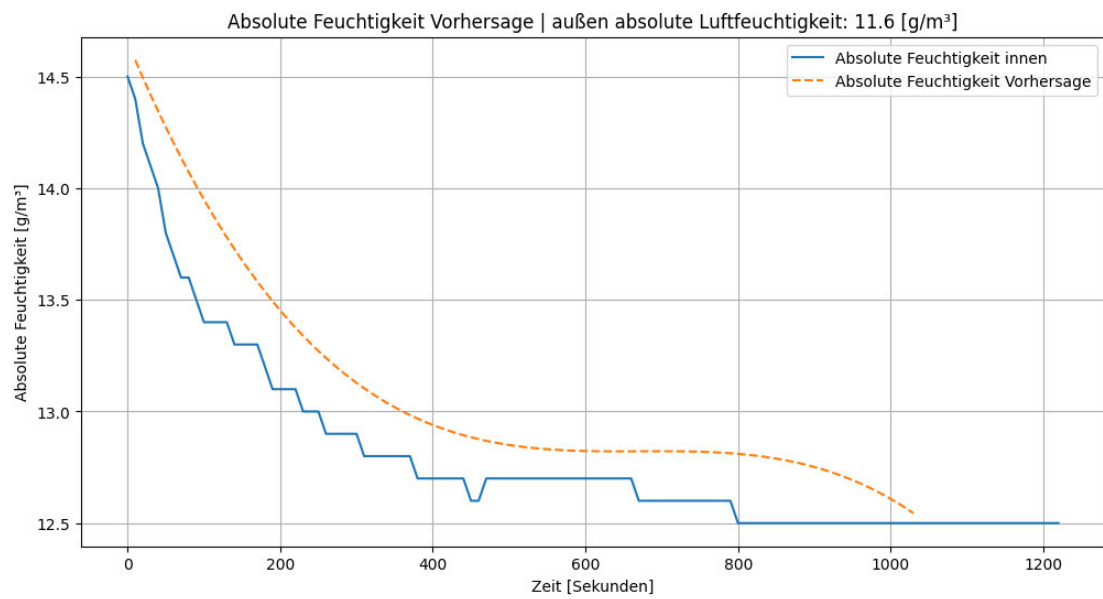


Abbildung 4.30: Absolute Feuchtigkeit außen 11.6 g/m<sup>3</sup>



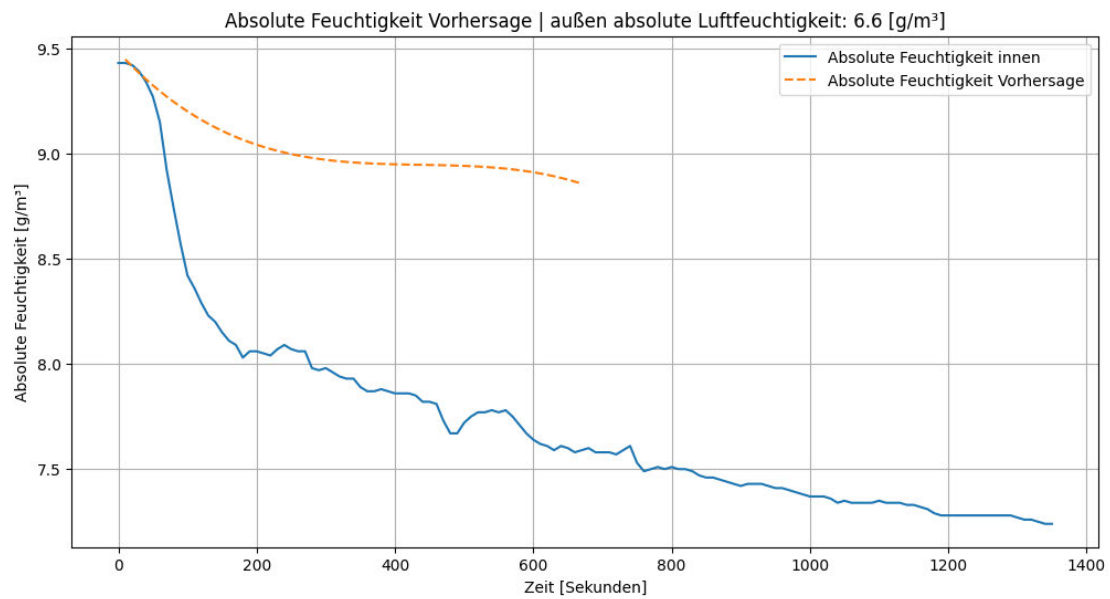


Abbildung 4.31: Absolute Feuchtigkeit außen 6.6 g/m<sup>3</sup>

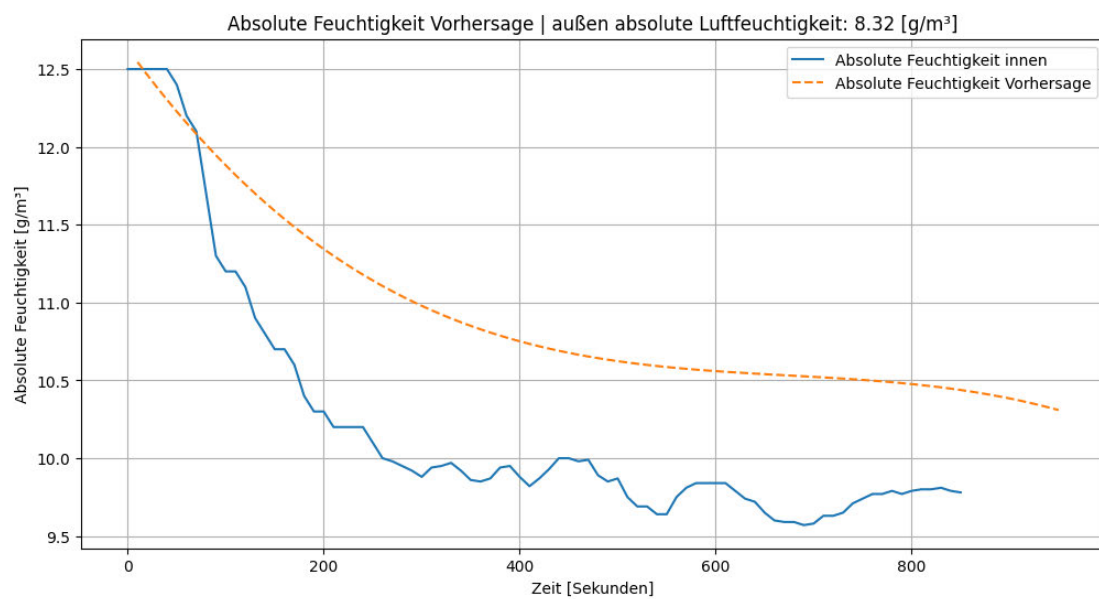


Abbildung 4.32: Absolute Feuchtigkeit außen 8.32 g/m<sup>3</sup>

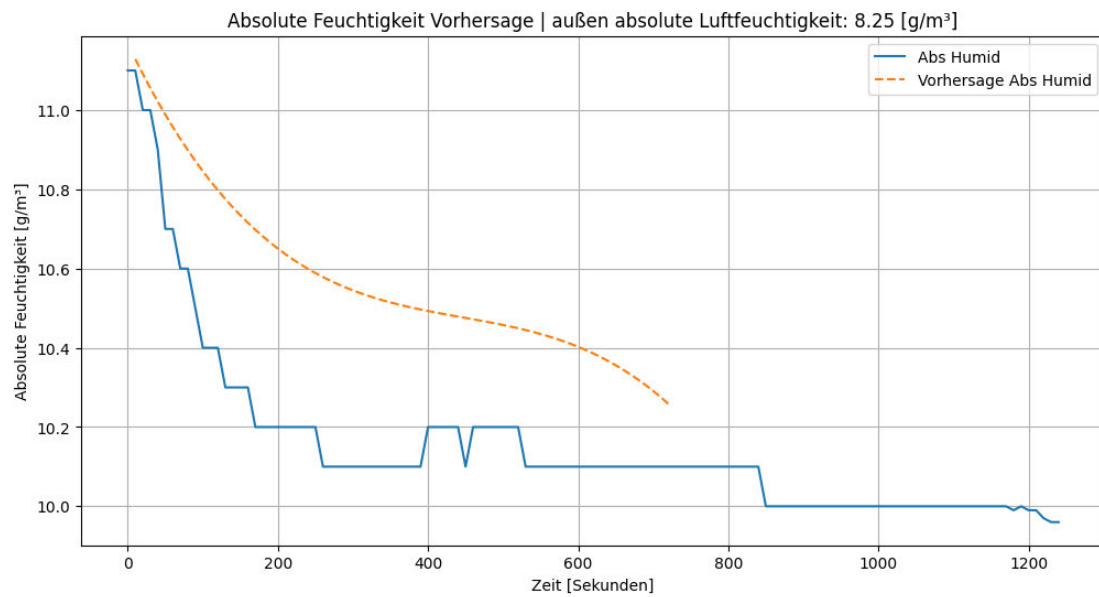


Abbildung 4.33: Absolute Feuchtigkeit außen 8.25 g/m<sup>3</sup>

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Vorhersagemodelle bei der Temperatur recht gut funktionieren mit der Einschränkung, dass die Vorhersage bei höheren Außentemperaturen zu konservativ ist. Das CO<sub>2</sub>-Modell kann ebenfalls ausreichend eine genaue Vorhersage für den Abfall der CO<sub>2</sub>-Konzentration treffen. Das Vorhersagemodell der absoluten Feuchtigkeit hingegen bietet keine wirkliche Aussagekraft, da die Abweichungen zu den realen Verläufen zu groß sind.

## 5 Empfehlungssystem

In diesem Kapitel wird die Entwicklung des Empfehlungssystems dargestellt. Dazu wird auf die Methodik eingegangen, nach der Empfehlungen an den Nutzer ausgegeben werden sollen. Ziel des Empfehlungssystems ist es, den vorher definierten Komfortbereich zu halten.

Die Empfehlungskomponente empfängt, wie die Vorhersagekomponente, die aktuellen Raumklimaparameter über MQTT von Node-RED und speichert diese. Zusätzlich publisht die Vorhersagekomponente, ebenfalls über MQTT, die aktuellen Vorhersagen für die einzelnen Raumklimaparameter und speichert diese ebenfalls.

Um dem Nutzer eine Empfehlung auszusprechen, wird über die Kommandozeile ein Text angezeigt, der dem Nutzer die relevanten Informationen und die Empfehlung präsentiert. Die Empfehlungskomponente verwendet eine regelbasierte Heuristik, um Entscheidungen über das Lüften zu treffen. Dabei sind die in 2.1 definierten Komfortbereiche in einzelne Funktionen ausgelagert und geben jeweils *True* oder *False* zurück, ob der jeweilige Parameter sich im Komfortbereich befindet. Hierbei wurde von dem in Kapitel 2.1 definierten Grenzwert für die VOC-Konzentration abgewichen, da durch die Betrachtung in 4.4.1 ein ständiges Lüften der Fall wäre, um diesen Trend entgegenzuwirken wurde eine Grenze von 30 ppm gesetzt, da diese niedrig genug ist, um alle hohen Ausschläge zu erfassen und hoch genug, dass nicht jeder Ausschlag zum sofortigen Lüften führt. Sollten sich alle Parameter im Komfortbereich befinden und es wird gelüftet, gibt das Empfehlungssystem den Hinweis, dass aktuell nicht gelüftet werden muss und der Lüftungsprozess beendet werden kann. Sollte sich ein Parameter nicht im Komfortbereich befinden, überprüft die Komponente anhand der Vorhersage, ob durch ein Lüften der Komfortbereich erreicht werden kann. Sollte dies der Fall sein, teilt die Komponente dem Nutzer mit, dass der Komfortbereich erreicht werden kann und mit welchem vorhergesagten Wert zu rechnen ist. Zusätzlich wird aus der Vorhersage berechnet, wie lange der Nutzer lüften muss, um den vorhergesagten Wert zu erreichen. Da nicht ständig für ein oder zwei Minuten gelüftet werden soll, um den Komfortbereich zu halten, wird eine Empfehlung erst ausge-

sprochen, wenn die Lüftungsdauer größer als zehn Minuten ist, sodass ein ausreichender Luftaustausch ermöglicht wird. Sollte der Komfortbereich trotz Lüftens nicht erreicht werden, teilt die Empfehlungskomponente trotzdem mit, welchen Wert man bei entsprechender Lüftungsdauer erreichen kann. Sollte keine Verbesserung möglich sein, wird dies dem Nutzer ebenfalls zurückgemeldet. Die Empfehlungen werden auf dem Terminal wie in Abbildung 5.1 ausgegeben:

```
Model temperature loaded successfully
Model absHumidity loaded successfully
Model co2 loaded successfully
Connected to MQTT Broker!
Empfehlung:
Lüften für 16 Minuten um einen CO2-Gehalt von 447.91 zu erreichen. Differenz: -1969.09 ppm
Du kannst durch Lüften aktuell nicht die Komforttemperatur erreichen, falls du dennoch Lüften möchtest erreichst
du in 17 Minuten eine Temperatur von 25.53 Grad. Differenz: -1.05 Grad
```

Abbildung 5.1: Beispielhafte Ausgabe der Empfehlungssystems

Eine Problematik der Empfehlungskomponente, entsteht, wenn die Vorhersagekomponente keine Vorhersage treffen kann, weil die aktuellen Raumklimaparameter nicht innerhalb der Grenzen des jeweiligen Vorhersagemodells liegen. Dies kann dazu führen, dass der Nutzer eine Empfehlung bekommt, dass es sich aktuell nicht lohnt zu lüften, obwohl Lüften zu einer Verbesserung des Raumklimas führen würde.

## 6 Kritische Betrachtung der erhobenen Daten

In diesem Kapitel wird kurz eine kritische Betrachtung der Daten mit Blick auf den Datenschutz des Nutzers durchgeführt. Dabei wird auf das Missbrauchspotenzial der erhobenen Daten eingegangen.

Die Analyse der Raumklimaparameter in 4.4.1 ermöglicht tiefgehende Einblicke in persönliche Informationen und Verhaltensweisen der Bewohner. Beispielsweise kann durch die Überwachung der CO<sub>2</sub>-Konzentration die Anwesenheit von Personen festgestellt werden. Somit lässt sich durch die Schwankungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration feststellen, wann Personen die Wohnung betreten oder verlassen und ob sich mehrere Personen gleichzeitig im Raum befinden. Denkt man hier weiter, könnte durch die Erhebung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in jedem Raum der Wohnung ein Bewegungsprofil erstellt werden, das Aufschluss darüber gibt, wann sich die Person in welchem Raum für wie lange aufgehalten hat. Darüber hinaus ermöglichen flüchtige organische Verbindungen und die Luftfeuchtigkeit Rückschlüsse auf Aktivitäten wie Kochen, da diese typischerweise während des Kochvorgangs ansteigen. Ebenso kann über die Luftfeuchtigkeit festgestellt werden, wann eine Person duscht oder ihre Wäsche zum Trocknen aufhängt, da beide Tätigkeiten zu erhöhten Feuchtigkeitswerten führen.

Solche Datenerhebungen und Analysen bieten somit nicht nur wertvolle Informationen für die Verbesserung des Wohnkomforts und Raumklimas, sondern werfen auch wichtige Fragen des Datenschutzes und der Privatsphäre auf. Sie bilden einen tiefen Eingriff in die Privatsphäre der Bewohner und offenbaren Einblicke in das Verhalten der Nutzer. Ein verantwortungsbewusster Umgang mit diesen erhobenen Daten sollte oberste Priorität haben, um missbräuchlichen Gebrauch durch beispielsweise den Vermieter oder Hacker zu verhindern.

## 7 Fazit und Ausblick

Nachdem das entstandene System in der Praxis angewandt wurde, wird nun die Arbeit abschließend resümiert. Dazu werden die Erkenntnisse kurz zusammengefasst, aufgetretene Probleme bei der Entwicklung genannt und Lösungsmöglichkeiten diskutiert.

Diese Arbeit zeigt die Entwicklung eines Empfehlungssystems, das dem Nutzer auf Basis von verschiedenen Vorhersagemodellen eine Empfehlung ausspricht, ob zum aktuellen Zeitpunkt gelüftet werden sollte und inwiefern sich die jeweiligen Raumklimaparameter durch das Lüften verändern würden. Dazu wurde für die einzelnen Raumklimaparameter ein Komfortbereich definiert und die Testumgebung, in der das System entwickelt wurde, vorgestellt und beschrieben. Es wurden die einzelnen Anforderungen an das System festgestellt und ein Konzept erarbeitet, das diese umsetzt. Dazu wurden für die Datenaquisition verschiedene Sensoren vorgestellt und auf deren Positionierung im Raum eingegangen. Als Nächstes wurde dargestellt, wie der Fluss der Daten ist und wie diese gespeichert und visualisiert werden. Anschließend wurde sich ein Überblick der erhobenen Daten verschafft und die Relevanz für das Empfehlungssystem bewertet. Darauf wurde gezeigt, wie aus den erhobenen Daten ein Vorhersagemodell entwickelt wurde und dessen Aussagekraft für die jeweiligen Raumklimaparameter bewertet. Anschließend wurde auf die Implementierung des Empfehlungssystems eingegangen. Außerdem wurden die erhobenen Daten kritisch auf möglichen Missbrauch betrachtet.

Im Großen und Ganzen lässt sich das entstandene System als *Proof-of-Concept* einordnen. Die zu Beginn gesteckten Ziele, dass dem Nutzer eine Empfehlung ausgesprochen wird, wann er lüften soll, wurden erreicht. Jedoch ist die Aussagekraft dieser Empfehlung kritisch einzuordnen, wenngleich die zugrundeliegenden Modelle für die CO<sub>2</sub>-Konzentration und Temperatur grundsätzlich zufriedenstellende Ergebnisse liefern, jedoch verändern kleinere Schwankungen beim Startwert der CO<sub>2</sub>-Konzentration, und höhere Außentemperaturen die Aussagekraft in den Vorhersagemodellen und weisen somit wenig Zuverlässigkeit auf. Die Aussagekraft für die Vorhersage der absoluten Feuchtigkeit lässt sich

nicht bestätigen, da diese eine zu große Abweichung zu den realen Verläufen aufweist. Hier sollten die Modelle überarbeitet werden. Eine weitere Möglichkeit wäre, die Modelle in verschiedenen Abschnitte aufzuteilen, sodass diese besser angepasst werden können.

Ein Punkt, der sehr gut funktioniert hat, war der Prozess der Datenakquisition. Hier hat sich das MQTT-Protokoll als zuverlässige Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten erwiesen. Das einzige kleine Problem bestand beim Verbindungsverlust des W-LANs beim ESP32. Hier wurde sich nicht wieder mit dem MQTT-Broker verbunden und der ESP32 musste neu gestartet werden, was zu einem Verlust an erhobenen Daten geführt hat, da der BME680 sich erst wieder kalibrieren musste. Dies deutet auf eine nicht sauber implementiertes reconnect Verfahren hin, was sicherlich jedoch in Zukunft behoben werden kann. Es sollte jedoch zusätzlich noch ein Monitoringsystem hinzugefügt werden, was einen informiert, wenn längere Zeit keine Daten von einem Sensor erhoben werden, da sonst der Ausfall nicht bemerkt wird. Node-RED als zentrales Hub für die Datenerfassung hat sich ebenfalls sehr bewährt, da dort durch die grafische Oberfläche und die schon existierenden Nodes für die verschiedenen Schnittstellen zur InfluxDB und für MQTT schnell eine Lösung für die Datenzusammenführung implementiert werden konnte und auch die Abfrage zur Wetter-API direkt eingebunden werden konnte. Was bei der Datenerhebung jedoch diskutiert werden sollte, ist die Auswahl und Anzahl der Sensoren. Die Notwendigkeit eines zweiten CO<sub>2</sub>-Sensors treibt nicht nur die Komplexität des Systems, sondern auch die Kosten in die Höhe. Der AC2M bietet zwar im Vergleich zu anderen CO<sub>2</sub>-Sensoren, die die CO<sub>2</sub>-Konzentration wirklich messen können, eine recht kostengünstige Lösung, ist jedoch für das Gesamtsystem suboptimal. Deshalb sollte in Zukunft geschaut werden, ob es bessere Alternativen zum BME680 gibt, die den CO<sub>2</sub>-Gehalt zuverlässiger erfassen und nicht von der Luftfeuchtigkeit beeinflusst werden. Des Weiteren ist die Integration des AC2M in das System nicht einfach gewesen und konnte nur durch die Bereitstellung der Software zum Auslesen realisiert werden.

Ein weiterer Punkt der nur die Einordnung als *Proof-of-Concept* spricht, ist die Problematik für die umfassende Erfassung der Raumklimaparameter in unterschiedlichen Situationen. Es mussten über einen Zeitraum von acht Monaten Daten erhoben werden, um genug diversifizierte Datensätze für die Modellbildung zu erhalten. Da die Daten im Alltag aufgenommen wurden und somit keine Systematik dahinter steckt, ist ein weiterer Punkt die Auswahl der Daten für Erstellung der Vorhersagemodelle. Dieser Schritt muss zwangsläufig manuell durchgeführt werden, was sehr zeitaufwendig war, da Grafana bzw. die InfluxDB recht lange brauchen, um große Datensätze mit mehreren Parametern anzuzeigen. Dieser Prozess könnte vielleicht durch schnellere Hardware etwas beschleunigt werden, jedoch sollten zukünftige Arbeiten die Automatisierung der Datensatzauswahl

verbessern. Erschwerend kam hinzu, dass die Lüftungsdauer in den Wintermonaten deutlich kürzer ist, was bei der Modellbildung ein Problem darstellte, da dort alle Datensätze gleich lang sein müssen. Hier könnte in Zukunft eine Polynomregression auf den zu kurzen Datensätzen durchgeführt werden, um diese zu erweitern und fehlende Daten zu generieren. Da dieser Prozess so lange dauert und die Sensoren stark auf den Raum angepasst sind, was Positionierung und Verkabelung des Reedkontakts angeht, erweist sich die Methode der Modellerstellung als unpraktikabel für die Erweiterung auf verschiedene Räume oder Wohnanlagen.

In Zukunft sollten außerdem noch die folgenden Punkte angesprochen werden. Es könnte in die Betrachtung noch der Taupunkt hinzugenommen werden, um Schimmelbildung in der Wohnung zu verhindern. Zusätzlich sollte ein GUI für den Nutzer implementiert werden. Hierfür könnte Node-RED genutzt werden, da dort leicht Dashboards implementiert werden können und die Einbindung über MQTT sehr einfach ist. Eine weitere spannende Betrachtung wäre die Hinzunahme von mehreren Steuerungskomponenten für das Raumklima, wie ein Heizungs- oder Klimaanlagesteuerung. Diese würde die Möglichkeiten für deutlich komplexere Regelungssysteme ermöglichen. Zusätzlich könnte noch untersucht werden, welchen Effekt die Windgeschwindigkeit und Richtung hat, da diese Informationen bei der Wetter-API vorliegen.



# Literaturverzeichnis

- [1] <https://www.air-q.com/messwerte/voc>. – Online; Accessed: 14-July-2024
- [2] <https://hackaday.io/project/5301-reverse-engineering-a-low-cost-usb-co-monitor>. – Online; Accessed: 15-July-2024
- [3] DIN EN 15251:2012-12: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. Nr. DIN EN 15251:2007-08
- [4] Health evaluation of carbon dioxide in indoor air. In: *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* 51 (2008), November, Nr. 11, S. 1358–1369. – URL <https://doi.org/10.1007/s00103-008-0707-2>
- [5] <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/fluechtige-organische-verbindungenwie-konnen-voc-vermindert-werden>. 2016. – Online; Accessed: 14-July-2024
- [6] AHN, Jungmo ; KO, JeongGil ; KIM, Hyungi ; KIM, Eunha: Volatile Organic Compounds Recognition Using a Smartphone Camera and Fluorometric Sensors. In: *Proceedings of the 2018 ACM International Joint Conference and 2018 International Symposium on Pervasive and Ubiquitous Computing and Wearable Computers*. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2018 (UbiComp '18), S. 1364–1371. – URL <https://doi.org/10.1145/3267305.3274185>. – ISBN 9781450359665
- [7] AKRAM, Saba ; ANN, Quarrat U.: Newton raphson method. In: *International Journal of Scientific & Engineering Research* 6 (2015), Nr. 7
- [8] FRANK ANTWERPES, Bijan F.: <https://flexikon.doccheck.com/de/Atemluft>. – Online; Accessed: 15-July-2024

- [9] CHEN, Yujiao ; NORFORD, Leslie K. ; SAMUELSON, Holly W. ; MALKAWI, Ali: Optimal control of HVAC and window systems for natural ventilation through reinforcement learning. In: *Energy and Buildings* 169 (2018), S. 195–205. – URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778818302184>. – ISSN 0378-7788
- [10] GRÜN, Gunnar ; SEDLBAUER, Klaus (Hrsg.) ; HAUSER, Gerd (Hrsg.): *Modellierung eines Komfortindex zur Beurteilung des Raumklimas am Beispiel der Passagierflugzeugkabine*. Stuttgart, Germany : Fraunhofer Verlag, Juli 2009 (Forschungsergebnisse aus der Bauphysik)
- [11] NIENABER, Felix ; REWITZ, Kai ; SEIWERT, Paul ; MÜLLER, Dirk: Einfluss der Luftfeuchte auf den Menschen und seine Gesundheit. RWTH Aachen University, 2021. – Forschungsbericht
- [12] TONG, Zheming ; CHEN, Yujiao ; MALKAWI, Ali: Estimating natural ventilation potential for high-rise buildings considering boundary layer meteorology. In: *Applied Energy* 193 (2017), S. 276–286. – URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917301721>. – ISSN 0306-2619
- [13] VEDDER, Sebastian: *Absolute Feuchtigkeit*. <https://electric-junkie.de/2022/01/absolute-luftfeuchtigkeit>. 2022. – Online; Accessed: 6-Februar-2024
- [14] WITTMANN, M.: *Innenraumklima: Temperatur und Luftfeuchtigkeit*. S. 433–443. In: SCHULTZ, Konrad (Hrsg.) ; PETRO, Wolfgang (Hrsg.): *Pneumologische Umweltmedizin: Atmungsorgane und Umwelt*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1998. – URL [https://doi.org/10.1007/978-3-642-72021-5\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-642-72021-5_26). – ISBN 978-3-642-72021-5

## A Anhang



Abbildung A.1: Anbringung des Reedkontakts

```
{
  "coord": {
    "lon": 10.0217,
    "lat": 53.5483
  },
  "weather": [
    {
      "id": 500,
      "main": "Rain",
      "description": "light rain",
      "icon": "10n"
    }
  ],
  "base": "stations",
  "main": {
    "temp": 17.84,
    "feels_like": 17.72,
    "temp_min": 16.91,
    "temp_max": 18.3,
    "pressure": 1009,
    "humidity": 78,
    "sea_level": 1009,
    "grnd_level": 1007
  },
  "visibility": 10000,
  "wind": {
    "speed": 3.6,
    "deg": 80
  },
  "rain": {
    "1h": 0.97
  },
  "clouds": {
    "all": 0
  },
  "dt": 1721092417,
  "sys": {
    "type": 1,
    "id": 1263,
    "country": "DE",
    "sunrise": 1721099475,
    "sunset": 1721158820
  },
  "timezone": 7200,
  "id": 2911288,
  "name": "Hamburg-Mitte",
  "cod": 200
}
```

Abbildung A.2: Beispielhafte Antwort der Wetter-API

### **Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

<hr/>	<hr/>	
Ort	Datum	Unterschrift im Original