Dokumentation Diplomarbeit

Vernetzte Raumklimasteuerung: «IoT-System zur automatischen Regulierung der Lüftung und Luftwäsche»



Abbildung 1 / Sperrholz-Modell im Massstab 1:30

Autor
Mario Wicki
Falkenweg 13
3110 Münsingen
B-TSY-23-T-a

Schule
TEKO Bern

Betreuungsperson
Martin Weber
Dozent Physik und Chemie

Abgabedatum
02.11.2026

Management Summary

Die bedarfsgerechte Steuerung von Lüftung und Luftwäschern setzt die Erfassung relevanter Raumklimawerte voraus. Ziel dieser Diplomarbeit war die Entwicklung eines vernetzten Demonstrationssystems, das den Zusammenhang zwischen Luftqualität, Messwertverarbeitung und automatischer Aktoransteuerung anhand eines Wohnungsmodells im Massstab 1:30 veranschaulicht.

Der Prototyp erfasst CO_2, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Feinstaub und VOC-Index in zwei Modellräumen sowie im Frischluftkanal. Die Komponentenwahl erfolgte anhand der Messaufgaben, Schnittstellen und elektrischen Anforderungen. Für CO_2 wurden SCD-41-Sensoren eingesetzt; SEN54 erfassen weitere Raumklimagrössen wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, VOC und Feinstaub. Zwei BME280 ermöglichen eine prototypische Filterüberwachung durch die Differenz ihrer Druckmesswerte. Ein I^2C-Multiplexer trennt Sensoren mit identischen Adressen. Drei Lüfter und RGB-LEDs stellen die Betriebszustände modellhaft dar.

Die Architektur trennt lokale Regelung und übergeordnete Datenverarbeitung. Ein Arduino verarbeitet die Sensorwerte und steuert die Lüfter anhand festgelegter Prototypschwellen. Ein Raspberry Pi empfängt die Daten über USB-Seriell, speichert sie in InfluxDB und visualisiert sie mit Grafana. Raspberry Pi OS Lite reduziert den Ressourcenbedarf der Betriebssystemumgebung. Die Serveranwendungen werden in Docker-Containern betrieben; Node-RED und MQTT ermöglichen die Bedienung und Zustandsrückmeldung der Filterüberwachung.

Funktionstests zeigten Messwertänderungen bei CO_2-, Feuchte-, VOC- und Partikeleinflüssen sowie beobachtete Lüfterreaktionen. Überwiegend einseitige Testeinflüsse veranschaulichten die raumbezogene Regelung. Unterschiedliche Sperrholzöffnungen simulierten Strömungswiderstände und lösten Änderungen der Filterstatusanzeige aus. Ein erhöhter VOC-Index führte zur Meldung belasteter Zuluft. Die Nachtkühlung wurde implementiert, jedoch nicht praktisch getestet.

Der Prototyp demonstriert die Verknüpfung von Messwerterfassung, Speicherung, Visualisierung und Regelung. Die Versuche belegen jedoch weder eine vollständige Sensorkalibrierung noch reale Filterleistung, Kühlwirkung oder Energieeinsparung. Die Übertragbarkeit auf eine reale Wohnung ist durch dieses Modell begrenzt.

Empfohlen werden reproduzierbare Schwellentests, Referenzmessungen, eine Überprüfung der Druckauswertung sowie der ausstehende Nachtkühlungstest. Messungen von Lüfterleistung und Stromaufnahme können die technische Bewertung ergänzen. Für einen erweiterten Dauerbetrieb sollten zudem Datensicherung, Wiederherstellung und Zugriffsschutz überprüft werden.

Inhaltsverzeichnis

Management Summary 1

Glossar 4

1 Einleitung 8

1.1 Beruflicher Lebenslauf 10

1.2 Ausgangslage und Problemstellung 10

1.3 Zielsetzung 12

1.4 Planung 13

1.5 Zeitplan (Gant-Diagramm) 14

2 Hauptteil 15

2.1 Vorgehen 15

2.1.1 Anforderungen und Systemkonzept 15

2.1.2 Komponentenwahl 17

2.2 Aufbau und Umsetzung 24

2.2.1 Modell 25

2.2.2 Schaltungsaufbau und Verdrahtung 27

2.2.3 Firmware und Regelungslogik 31

2.2.4 Raspberry Pi, Kommunikation und Datenpfad 34

2.2.5 Bedienung und Visualisierung 38

2.2.6 Testverfahren und Kalibrierung 41

2.3 Ergebnisse 42

2.3.1 Prototyp und Sensor-Datenfluss 42

2.3.2 Regelungslogik der Räume 45

2.3.3 Filterüberwachung und Zuluftqualität 51

2.3.4 Nachtkühlung 53

2.3.5 Nachweis der Projektziele 53

3 Schlussteil 55

3.1 Diskussion 55

3.2 Schlussfolgerung 56

3.3 Empfehlungen und Ausblick 56

4 Eigenständigkeitserklärung 58

5 Verzeichnisse und Hilfsmittel 59

5.1 Abbildungsverzeichnis 59

5.2 Tabellenverzeichnis 61

5.3 Quellenverzeichnis 62

5.4 Hilfsmittel und Tools 66
6 Anhang 67
Anhang A Themeneingabe 67
Anhang B Firmware Umgebung 67
Anhang C Diagramm Regelungslogik 67
Anhang D Verdrahtungsübersicht Sensorik, I2C Bus, Aktoren und LED Versorgung 68
Anhang E Systemarchitektur 69
Anhang F I2C-Topologie 70
Anhang G Diagramm Filterüberwachung (Differenzdruck) 71
Anhang H Diagramm Nachtkühlung 72
Anhang I Diagramm Node-RED Bedienoberfläche 72
Anhang J Datenfluss Diagramm 73
Anhang K Umsetzung Aufbau Komponenten und Verdrahtung 74

Glossar

Aktor	Ein Aktor (auch Aktuator) ist ein technisches Bauteil, das Steuerungs- oder Schaltsignale in eine physikalische Wirkung – wie mechanische Bewegung, Kraft, Druck oder Temperatur – umsetzt.
Arduino	Arduino ist eine Open-Source-Physical-Computing-Plattform, die aus benutzerfreundlicher Elektronik-Hardware (Microcontroller-Boards) und einer dazugehörigen Software besteht.
Axiallüfter	Ein Axiallüfter ist ein kompakter, elektrischer Ventilator, der z.B. mit einer Gleichspannung von fünf Volt (DC) betrieben wird und Luft parallel (axial) zu seiner Rotationsachse bewegt.
CO_2	Kohlenstoffdioxid (CO_2) ist ein farb- und geruchloses Gas, das natürlicher Bestandteil der Luft und Teil des globalen Kohlenstoffkreislaufs ist. Es spielt eine wichtige Rolle in der Photosynthese, bei der Pflanzen CO_2 in Sauerstoff umwandeln. Gleichzeitig ist CO_2 ein bedeutendes Treibhausgas. Der CO_2 wir in ppm gemessen.
Dashboard	Ein Dashboard (Instrumententafel) ist eine visuelle Benutzeroberfläche, die wichtige Kennzahlen, Daten und Informationen übersichtlich auf einem einzigen Bildschirm zusammenführt.
Docker Compose	Werkzeug zur Konfiguration und Verwaltung mehrerer Docker-Container über eine YAML-Datei. Darin werden Dienste, Netzwerke, Portfreigaben und Datenvolumes beschrieben. Im Projekt dient es zur Bereitstellung der containerisierten Serverdienste auf dem Raspberry Pi.
eCO_2	eCO_2 steht für äquivalentes Kohendioxid (engl. equivalent carbon dioxide), wird im Deutschen aber meistens als CO_2-Äquivalent (oft abgekürzt als CO_2e) bezeichnet. Es handelt sich dabei um eine Masseinheit, die verwendet wird, um die Gesamtwirkung aller Treibhausgase auf das Klima vergleichbar zu machen. Günstige Luftgütesensoren für den Innenraum messen oft nicht echtes CO_2, sondern flüchtige organische Verbindungen (VOCs) und schätzen daraus den "eCO_2"-Wert, um anzuzeigen, wann gelüftet werden muss.
FlowFuse Dashboard 2	Erweiterung für Node-RED zur Erstellung browserbasierter Bedienoberflächen mit Schaltern, Textanzeigen und weiteren Anzeigeelementen. Im Projekt stellt sie die Oberfläche für Filterüberwachung, Differenzdruck und Statusmeldungen bereit.
Grafana	Grafana ist eine von Grafana Labs entwickelte Open Source-Plattform zur interaktiven Datenvisualisierung. Nutzende können ihre Daten in Form von Diagrammen und Graphen darstellen, die in einem oder mehreren Dashboards zusammengefasst sind und so die Interpretation und das Verständnis von Daten erleichtern.
InfluxDB	InfluxDB ist ein spezialisiertes, quelloffenes Datenbankmanagementsystem (DBMS) von InfluxData, das optimiert ist, um Zeitreihendaten (Time Series Data) in Echtzeit zu erfassen, zu speichern und abzufragen.
I^2C	Eine I^2C-Schnittstelle (Inter-Integrated Circuit), handelt es sich um einen seriellen Datenbus. Das Besondere beim I2C ist das mit lediglich 2 Leitungen mit normalerweise bis zu 128 Teilnehmern kommuniziert werden kann.

JSON	(JavaScript Object Notation). Textbasiertes, sprachunabhängiges Format zum Austausch strukturierter Daten über Schlüssel-Wert-Paare. Im Projekt überträgt der Arduino Messwerte und Betriebszustände als JSON-Nachrichten über USB-Seriell an die Serial-Bridge auf dem Raspberry Pi.
LED	Eine LED Light Emitting Diode (Leuchtdiode), ist ein elektronisches Halbleiter-Bauelement, das Licht abstrahlt, wenn elektrischer Strom in Durchlassrichtung fliesst.
Logic Level Shifter	Ein Logic Level Shifter (Pegelwandler) ist ein elektronisches Modul, das Signale zwischen zwei unterschiedlichen Betriebsspannungen typischerweise 5 V (Arduino-Boards) und 3,3 V (Sensoren, Modulen) sicher übersetzt. Schliesst man einen empfindlichen 3,3-Volt-Sensor direkt an die 5V-Datenpins an, kann das Bauteil durch Überspannung beschädigt oder zerstört werden. Ein guter Level Shifter wandelt Signale in beide Richtungen (Bidirektionale Kommunikation) um (von 5V auf 3.3V und von 3.3V auf 5V). Das ist wichtig für Bussysteme wie I^2C.
Mikrocontroller	Ein Mikrocontroller (MCU oder Einchipmikrorechner) ist ein kompakter Einchip-Computer, der einen Prozessor (CPU), Arbeitsspeicher (RAM), programmierbaren Festwertspeicher (Flash/EEPROM) sowie Ein- und Ausgabeschnittstellen (Peripherie) auf einem einzigen integrierten Schaltkreis (IC) vereint.
Mosquitto	Leichtgewichtiger Open-Source-MQTT-Broker. Im Projekt läuft Mosquitto auf dem Raspberry Pi und vermittelt Nachrichten zwischen der Serial-Bridge und Node-RED.
MOSFET	(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor). Spannungsgesteuerter Transistor, der als elektronischer Schalter eingesetzt werden kann. Im Projekt schalten die MOSFETs der VMA411-Module den Lüfterstrom anhand der PWM-Steuersignale des Arduino. Dadurch müssen die Arduino-Ausgänge nicht den Laststrom der Lüfter liefern.
MQTT	(Message Queuing Telemetry Transport) Leichtgewichtiges Nachrichtenprotokoll nach dem Publish/Subscribe-Prinzip. Ein Broker vermittelt Nachrichten über benannte Themen («Topics») zwischen Sendern und Empfängern. Im Projekt werden damit Bedienbefehle, Telemetrie und Statusmeldungen übertragen.
Multiplexer	Ein Multiplexer ist ein Bauteil für Schaltungen, welches über mindestens 2 Dateneingänge, Steuereingänge und genau 1 Ausgang verfügt. Diese können wie eine Art Schalter beschrieben werden. Dabei wird der jeweilige Wert des Eingangs an den Ausgang weitergeleitet, welcher gerade durch den binärcodierten Wert über Steuereingänge aktiv geschaltet ist. So können mehrere Datenströme zusammengefasst werden.
NDIR	Verfahren zur CO_2-Messung, bei dem CO_2-Moleküle moduliertes Infrarotlicht absorbieren. Die dadurch entstehende periodische Erwärmung erzeugt Druckschwankungen, die ein Mikrofon erfasst. Aus dem Signal wird die CO_2-Konzentration bestimmt. Sensirion verwendet dieses Messprinzip im SCD-41. NDIR steht für «nichtdispersive Infrarotspektroskopie», PA für «photoakustisch».

Netzteil	Unter einem Netzteil versteht man ein Gerät, welches zur Energieversorgung eines Gerätes benutzt wird, dessen Energiebedarf tiefer ist als die Spannung, welche von der Steckdose bereitgestellt wird.
Node-RED	Flussbasiertes Entwicklungswerkzeug, bei dem Funktionsbausteine («Nodes») grafisch zu Abläufen («Flows») verbunden werden. Im Projekt verarbeitet Node-RED MQTT-Nachrichten für die Filterbedienung und Statusanzeige.
Open-Drain	Das Open-Drain-Prinzip: "Open Drain" bedeutet, dass die Ausgangstransistoren im Sensor die Busleitungen (SDA/SCL) aktiv nur auf Masse (GND, logisch 0) ziehen können. Der Sensor ist physikalisch nicht in der Lage, die Leitung von sich aus auf die Versorgungsspannung (5 V oder 3,3 V, logisch 1) zu legen.
PM	Particulate Matter (Schwebeteilchen). Feinstaub wird nach der Grösse der Schwebeteilchen in Mikrometern eingeteilt. Je kleiner die Teilchen, desto tiefer dringen sie in die Atemwege ein.
PM2.5	Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 2.5 µm. Sie sind eine Untergruppe von PM10 und dringen bis tief in die Lungenbläschen (Alveolen) und teilweise in den Blutkreislauf vor.
PM10	Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 10 µm (zum Vergleich: ein menschliches Haar ist etwa 50 bis 70 µm dick). Sie gelangen bis in die Bronchien.
ppm	parts-per-million (Anteile pro Million) die Masseinheit gibt an, wie viele Teilchen eines bestimmten Stoffes in einer Million Teile einer anderen Substanz enthalten sind
Pull-Up-Widerstände	Ein Pull-up-Widerstand ist ein Festwertwiderstand in der Digital- und Mikrocontrollertechnik, der eine Signalleitung dauerhaft mit der Betriebsspannung (z. B. +5V oder +3,3V) verbindet. Er sorgt dafür, dass ein digitaler Eingang (z. B. an einem Arduino oder Raspberry Pi) einen festen, definierten Zustand hat – nämlich HIGH (logische 1), solange kein aktives Signal anliegt. Ohne diesen Widerstand würde ein offener Pin (wenn ein Taster nicht gedrückt ist) „in der Luft hängen“ (floating). Er würde wie eine Antenne wirken und durch elektromagnetisches Rauschen zufällig zwischen HIGH und LOW hin- und herspringen.
PWM	Pulse Width Modulation (Pulsweitenmodulation). Ist bei einem Arduino eine Methode, ein PWM-Signal, mit einem digitalen Pin ein analog wirkendes Signal zu simulieren. In der Programmierung liegt der Wert dabei zwischen **0** (Dauer-AUS / 0% Tastverhältnis) und **255** (Dauer-AN / 100% Tastverhältnis). Auf dem Arduino-Board sind die PWM-fähigen Pins meist mit einer Tilde (**~**) gekennzeichnet.
QFE	(Query Field Elevation). Der tatsächliche, gemessene Luftdruck direkt auf Stations- oder Flugplatzhöhe (am Boden zeigt ein Höhenmesser mit QFE-Einstellung 0 Meter bzw. Fuss an).
QFF	(Query Field Full bzw. Reduktion auf Meereshöhe). Der auf den Meeresspiegel (NN) umgerechnete Luftdruck, der zusätzlich die tatsächliche Temperatur (und Feuchte) vor Ort berücksichtigt.
Raspberry Pi	Ein Raspberry Pi ist ein kreditkartengroßer Einplatinencomputer, der von der britischen Raspberry Pi Foundation entwickelt wurde.
retained	Kennzeichnung einer MQTT-Nachricht, die der Broker als letzte Nachricht eines Topics speichert und neuen Abonnenten unmittelbar zustellt. Im Projekt

	werden Statusmeldungen «retained» gespeichert, Bedienbefehle hingegen nicht, damit frühere Befehle nach einer erneuten Anmeldung nicht nochmals zugestellt werden.
RGB-LED	RGB steht für Rot, Grün und Blau - die Primärfarben des Lichts. Eine RGB-LED ist eine Art lichtemittierende Diode, die diese drei Farben kombiniert, um über 16 Millionen Farbtöne zu erzeugen. Diese Technologie wird in verschiedenen Anwendungen weit verbreitet, einschliesslich Bildschirmen, Beleuchtungssystemen und mehr.
RH / rF	Relative Humidity (relative Luftfeuchtigkeit rF) gibt in Prozent an, wie stark die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist.
SCD	Abkürzung vom Schweizer Sensorhersteller Sensirion, Sensor Carbon Dioxide (Kohlendioxid-Sensor), die Sensortechnologie.
Sensor	Ein Sensor (auch Messfühler, Detektor oder Messaufnehmer genannt) ist ein technisches Bauteil, das physikalische, chemische oder biologische Eigenschaften der Umgebung erfasst und diese in ein weiter verarbeitbares elektrisches Signal umwandelt.
Serial-Bridge	Software zur Vermittlung zwischen einer seriellen Verbindung und weiteren Schnittstellen. Im Projekt empfängt das Python-Programm auf dem Raspberry Pi die JSON-Messdaten des Arduino, speichert sie in InfluxDB und veröffentlicht Telemetrie sowie Statusmeldungen über MQTT. In Gegenrichtung leitet es MQTT-Bedienbefehle über USB-Seriell an den Arduino weiter.
Spannung	Die elektrische Spannung U einer elektrischen Quelle (genauer zwischen ihren beiden Polen) ist ein Mass für die "Stärke", mit der sie in einem angeschlossenen Stromkreis einen Strom aufrechterhält.
Telemetrie	Automatische Übertragung von Messwerten und Betriebszuständen zur weiteren Verarbeitung oder Überwachung. Im Projekt sendet der Arduino Sensordaten und Zustände als JSON-Nachrichten an den Raspberry Pi.
VOC	Volatile Organic Compounds (flüchtige organische Verbindungen) VOC umschreibt gas- und dampfförmige Stoffe organischen Ursprungs in der Luft. Dazu gehören zum Beispiel Kohlenwasserstoffe, Alkohole, Aldehyde und organische Säuren wie von Baustoffen, Wand- und Deckenverkleidungen, Wandfarben, Möbel und deren Leim, Reinigungsmittel und Lösemittel. Auch beim Kochen und Grillen können VOCs in die Luft abgegeben werden. Der VOC-Wert wird als eine Zahl angegeben, z. B. Wert 100 ist als "normale, gewohnte Raumluft" definiert.
VOC-Index	Der VOC-Index ist als relative Messung zu verstehen. Der Sensor analysiert kontinuierlich das Raumklima der letzten 24 Stunden und zeigt verlässlich, wann sich das Raumklima akut verschlechtert hat.
Widerstand	In dieser Arbeit ein elektrischer Widerstand (als Bauteil, auch *Resistor* genannt) ist ein passives elektronisches Bauteil, das den Fluss des elektrischen Stroms in einem Stromkreis gezielt hemmt, dämpft oder begrenzt. Er reduziert die Stromstärke, teilt Spannungen auf oder schützt empfindliche Bauteile (wie LEDs oder Mikrocontroller) vor zu hohen Strömen.

1 Einleitung

Im Rahmen meines Studiums, habe ich zum Abschluss der sechs Semester eine Diplomarbeit zu erarbeiten. Das Thema kann entweder ein Gebiet aus meiner beruflichen Tätigkeit widerspiegeln oder ein privates Projekt behandeln. In Anlehnung an (Hunziker, 2023), *Wie komme ich zu einem Thema?* Habe ich mir eine Fragestellung aus meinem privaten Umfeld ausgesucht, weil ich so das erlernte Wissen und die entwickelten Fähigkeiten aus den insgesamt sechs Semestern anwenden kann. Der vorgegebene Zeitrahmen für diese Diplomarbeit war vom 04.09.2026 bis 02.11.2026.

Eine gute Raumluftqualität bestimmt gemäss (Huber, 2021) massgeblich unsere Gesundheit, unseren Schlaf, Konzentration und das allgemeine Wohlbefinden. Die Kohlenstoffdioxid «CO_2» Konzentration ist dabei ein wichtiger Haupt-Indikator. Menschen und Tiere verbrauchen Sauerstoff. Bei jedem ausatmen stossen wir CO_2 aus, für Erwachsene in Wohnungen sind CO_2-Emissionen von mittlerer Tagesaktivität pro Person bei 18 – 20l/h, beim Schlafen 12 – 14l/h. Als CO_2 Grenzwert ist, oft 1'400ppm (Parts per Million) angegeben, und bei über 1400ppm kann es zu Kopfschmerzen und Konzentrationsschwierigkeiten führen. Aber lange bevor in einem Raum der Sauerstoff ausgeht, wird der Geruch unerträglich. Zudem kann auch die Konzentration an Schadstoffen wie z.B. durch Baumaterialien, Duftkerzen, Reinigungsmittel und vieles mehr ein gesundheitlich bedenkliches Mass erreichen. Räume werden also nicht in erster Linie gelüftet, um Sauerstoff zuzuführen, sondern um Belastungen abzuführen.

«Eine gute Raumluftqualität bestimmt massgeblich unseren Schlaf»

Der Autor

Folglich habe ich mich mit der Thematik Raumluftqualität vertieft befasst. Seit der Einführung des Minergie-Standards 1998 wurde die Komfortlüftung ab Ende der 1990er-Jahre zum festen Bestandteil für energieeffiziente Neubauten in der Schweiz. Eine Komfortlüftung führt gefilterte Frischluft von aussen in die einzelnen Wohnräume und führt gleichzeitig die verbrauchte, belastete Luft nach aussen ab. Dies allein genügt aber nicht, um ein gutes Raumklima zu erzeugen. Denn dafür benötigt man fünf Indikatoren wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, CO_2, flüchtige organische Verbindungen (VOC Volatile Organic Compounds) und der Feinstaub, um die tatsächliche Raumluftqualität zu ermitteln. Dabei gelten Empfehlungen unter anderem des BAG (Bundesamt für Gesundheit) die sich für Raumtemperatur und relativen Luftfeuchtigkeit auf den «Schlussbericht Raumluftfeuchte in Wohnneubauten» (Ganz Klima GmbH, 2007) stütz. Die sagen eine Raumtemperatur von 20 – 24°C, bei der relativen Luftfeuchtigkeit gehen die Meinungen von 30 – 65 % auseinander, wobei der Mittelwert 40 – 60 % von namhaften Lüftungs- und Heizungshersteller (Hoval Schweiz, o. J.) empfohlen wird. Beim CO_2 gelten die Empfehlungen 400 – 1000ppm (grüner Bereich), 1000 – 1400ppm (oranger Bereich) und > 1400ppm (roter Bereich). (BAG, 2022, S. 5) Für den Feinstaub gibt es Empfehlungen respektive Jahresmittelgrenzwerte von 10 µg/m^3 für PM2.5 und 20 µg/m^3 für PM10. (Bundesamt für Umwelt (BAFU) & Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), 2025) Beim VOC gibt es vom BAG keine Vorgaben oder Empfehlungen. Der Schweizer Sensor Hersteller Sensirion gibt eine Empfehlung ab, die besagt, dass ein VOC - Index von unter 150 einer guten Raumluft entspricht. (Sensirion AG, o. J.-b)

In dieser Arbeit habe ich eine vernetzte Raumklimasteuerung: «IoT-System zur automatischen Regulierung der Lüftung und Luftwäsche» entwickelt, um das Zusammenspiel von allen fünf Indikatoren zu vereinen, mit dem Ziel konstant ein optimales Raumklima zu gewährleisten. Das alles, ist als eine Simulation in einem Modell aus Sperrholz verpackt. In den nächsten Kapiteln werde ich vertieft auf die Umsetzung sowie die technischen Details eingehen und diese erläutern.

Das Thema Nachhaltigkeit hat für mich eine wichtige Rolle bei der Umsetzung der Arbeit gespielt, im Kontext heisst dies, die verwendeten Komponenten und Materialien wurden auf Ihre Lieferketten geprüft und heimische Produzenten oder Hersteller aus dem EU-Raum wurden bevorzugt, insbesondere der Schweizer Sensor Hersteller Sensirion.

1.1 Beruflicher Lebenslauf

Nach meiner Ausbildung als Mechatroniker, bin ich nun seit 23 Jahren im Aussendienst als Field Service Engineer tätig. Von denen ich sechs Jahre im Gastronomie Gewerbe, 14 Jahre in der Medizinaltechnik und jetzt seit drei Jahren im grafischen Gewerbe bei Ricoh Schweiz AG tätig bin. Die tägliche Herausforderung besteht darin den Gerätepark und Systeme bei den Kunden, fortlaufend Instand zustellen, komplexe Störungen sei mechanisch, elektronisch oder Software bedingt zu beheben. Zu meinem Aufgabenfeld gehört auch die Installation, Planung und Betreuung der Netzwerkumgebung sowie der digitalen Lösungen der Ricoh Schweiz AG. Die Einhaltung von Qualitätsstandards, Sicherheitsvorschriften und Compliance-Anforderungen, sowie Durchführung von Qualitätskontrollen und kontinuierliche Verbesserung von Arbeitsprozessen gehören ebenso zu meinem Pflichtenheft. Der tägliche Kontakt erfordert zudem ein hohes Mass an sozial- und Kommunikative Kompetenzen.

Um mich beruflich weiterzuentwickeln habe ich mich für dieses Studium Systemtechniker an der Teko Bern entschieden, weil mich die Kombination und das Vernetzen von Mechanik, Elektronik und Informatik fasziniert. Gerne würde ich zukünftig mein Wissen im Bereich Automation / Robotik einbringen.(TEKO, 2026)

1.2 Ausgangslage und Problemstellung

Meine Partnerin wohnt in einem Mehrfamilienhaus in einer 3 ½ Zimmer Wohnung im Parterre. Die Wohnung hat den Minergie – P - Standard, (*Minergie-P*, 2026) somit ist sie mit einer Komfortlüftung ausgestattet, die in drei Betriebsstufen geschaltet werden kann. Anfangs beklagte sie sich mehrfach über schlechten Schlaf und Müdigkeit am Morgen. Meine Vermutung war, dass in der Wohnung möglicherweise nicht ausreichend saubere und / oder gefilterte Aussenluft in die Innenräume befördert wurde. Auffallend ist dabei die Luftfeuchtigkeit, die zeitweise während der kalten Jahreszeit, oder wenn die Aussenluft zu trocken ist, unter 40% betrug. Auf meine Empfehlung hin, installierte sie in jedem Raum einen Luftbefeuchter/Wäscher von der Firma Venta. (Venta Air GmbH, 2026) Dies hat die Situation wesentlich verbessert, was sich darin zeigt, dass die installierten Luftbefeuchter/Wäscher in allen drei Räumen (Schlafzimmer 1, Schlafzimmer 2 und Wohnbereich) nahezu permanent im Betrieb sein müssen, um eine akzeptable Luftfeuchtigkeit von gut 50% während den Wintermonaten aufrechtzuerhalten. Denn zu trockner Luft birgt Risiken von zu trockenen Schleimhäuten und führt folglich zu Atemwegserkrankungen. Hinzu kommt, dass die Schlafqualität mit der Luftqualität korreliert, heisst die Luftqualität wirkt sich direkt auf die Schlafqualität aus. Bekannte Symptome sind häufiges Aufwachen, unruhiger Schlaf, verlängerte Einschlafzeit und dadurch erhöhter Cortisolspiegel. (Mouser Electronis, Inc., 2026)



Abbildung 2 / Venta Luftwäscher / Befeuchter

Da das ganze auf theoretischer Annahme basiert, ist es schwierig konkrete Massnahmen umzusetzen, die einem besseren Raumklima dienen. Ein wirklicher Mehrwert wäre, die Raumluftqualität sowie die Frischluftzufuhr in allen Räumen zu überwachen. Mit diesen Daten könnte dann die Komfortlüftung sowie die beiden Luftbefeuchter/Wäscher automatisch, intelligent gesteuert und das Raumklima nachhaltig reguliert werden. Denn die jetzige Situation ist, dass jetzt alles manuell bedient werden muss, was dazu führt, dass es entweder zu trocken, feucht oder zu stinkig ist, was nicht zufriedenstellend ist.

Die Problemstellung besteht darin, dass unklar ist, welche Qualität und Menge an Frischluft durch die Komfortlüftung tatsächlich nach innen gelangt, und inwieweit Verunreinigungen (Pollen, Schadstoffe, etc.) sowie Temperatur- und Feuchtigkeitswerte der zugeführten Aussenluft die Raumklimaverhältnisse beeinflussen. Eine intelligente, datengestützte Steuerung der Lüftungs- und Luftbefeuchtungssysteme könnte hier Abhilfe schaffen und zu einer optimalen Raumklimagestaltung sowie Energieeffizienz beitragen.

Es gibt Hersteller unter anderem von Komfortlüftungen, die optional Lösungen anbieten, um diesen Problemen entgegenzuwirken. Wie z.B. mit einem Enthalpietauscher zur Feuchterückgewinnung, der aus der Abluft nicht nur Wärme, sondern auch Feuchtigkeit (bis 70%) auf die Zuluft übertragen kann. Auch Messmodule die CO_2 und Feuchtigkeit messen kann man optional hinzufügen. Diese Optionen sind aber je nach dem relativ Kostspielig. (Zehnder Group Schweiz AG, 2025) Jedoch bei zu trockener Luft im Raum, ist daher auch die Rückgewinnung ungenügend. Heisst unter dem Strich muss man die Raumluft mit Feuchtigkeit zusätzlich anreichern. Hier setzt meine Vernetzte Raumklimasteuerung an. Mein Modell misst alle fünf Raumluftqualitäts-Indikatoren, reguliert und steuert die Komfortlüftung und Luftbefeuchter / Wäscher individuell. Die Daten sind via Dashboard visualisiert. Insbesondere für Allergiker wäre eine Datengestützte Echtzeitgesteuerte Raumklima Überwachung von grossem Nutzen, um Pollen oder sonstige Schadstoffe zu detektieren und nachhaltig zu reduzieren. In der Praxis ist es aber schwierig ein solches System umzusetzen, da die Komfortlüftung sowie die Luftbefeuchter / Wäscher nicht einfach so miteinander vernetzt werden können.

Eine zusätzliche interessante Funktion wäre, eine eingebaute Kühlung in den Sommermonaten. Bei Hitzetagen, sobald die Aussenluft unter 20°C abkühlt und die Raumtemperatur 24°C übersteigt, fährt die Komfortlüftung automatisch hoch, um einen kühlenden Effekt in den Räumen zu generieren, was für die Schlafqualität wiederum ein Mehrwert wäre.

1.3 Zielsetzung

Ziel dieser Diplomarbeit ist die Entwicklung und der Aufbau eines vernetzten Raumklima-Überwachungssystems. Anhand eines massstabsgetreuen Modells im Massstab 1:30, dessen Grundriss der Wohnung meiner Partnerin entspricht, soll veranschaulicht werden, wie Sensordaten zur bedarfsgerechten Steuerung einer Komfortlüftung und von Luftbefeuchtern / Wäschern genutzt werden kann.

Das Modell wird aus Sperrholz gefertigt. Sensoren erfassen Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, CO2, Feinstaub und VOC. 5V - Axiallüfter stellen die Betriebszustände der Komfortlüftung und der Luftbefeuchter / Wäscher modellhaft dar; RGB - LEDs visualisieren die jeweiligen Lüfterstufen. Ein Arduino übernimmt die Messwerterfassung und die Steuerungslogik. Ein Raspberry Pi speichert die Messwerte in InfluxDB und stellt sie über Grafana zur Visualisierung und Analyse bereit.

Ziel ist ein angestrebter Komfortbereich von 20 – 24°C Raumtemperatur, 40 – 60% relative Luftfeuchtigkeit und eine CO_2 - Konzentration unter 1.000 ppm. Die Temperatur wird im Modell überwacht, jedoch nicht geregelt, da dafür eine Heizungsregelung erforderlich wäre. Die Lüfter bilden die Wirkung der Komfortlüftung und Luftbefeuchter / Wäscher nur modellhaft ab. Die genannten Bereiche sind daher Zielwerte und keine garantierten Ergebnisse. Feinstaub und VOC werden ebenfalls berücksichtigt.

Mit der Simulation soll die Verknüpfung von Raumluftmessung und Lüftersteuerung aufgezeigt werden. Eine Aussage über die tatsächlich erreichbare Raumluftqualität oder eine Energieeinsparung in der Wohnung erfordert eine Erprobung und Messung unter realen Bedingungen.

Für Funktionstests werden im Modell gezielte Testreize eingesetzt wie Zigarettenrauch als Partikelquelle, Parfüm oder Nagellackentferner als VOC-Quelle sowie Atemluft als kurzfristiger CO2-Testreiz. Dabei wird geprüft, ob die Sensorwerte auf den Testreiz reagieren und die vorgesehene Lüfterstufe Komfort / Luftbefeuchter / Wäscher ausgelöst wird. Diese Tests überprüfen die Sensorreaktion und Steuerungslogik.

Um meine Arbeit in dem vorgegebene Zeitrahmen umzusetzen habe ich mir folgende Muss- und Kann-Ziele gesetzt:

- Muss-Ziele:
  1. Bis zum Abschluss der Diplomarbeit ein System mit Sensoren, Aktoren, Mikrocontroller und den erforderlichen elektronischen Bauteilen entwickeln und aufbauen, das Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, CO2, flüchtige organische Verbindungen (VOC) und Feinstaub in einem Demonstrationsraum erfasst und die modellhafte Komfortlüftung sowie den Luftwäscher automatisch ansteuert.
  2. Bis zum Abschluss der Diplomarbeit ein funktionsfähiges Demonstrationsmodell eines Raums im Massstab 1:30 aus Sperrholz erstellen und dokumentieren. Anhand definierter Mess- und Testsituationen soll gezeigt werden, wie die Steuerungslogik auf unterschiedliche Raumluftwerte reagiert.
- Kann-Ziele:
  1. Die Messdaten über einen Raspberry Pi mit InfluxDB speichern und mit Grafana visualisieren und analysieren.
  2. Das Sperrholzmodell auf drei Räume erweitern, um unterschiedliche Raumprioritäten, beispielsweise Schlafzimmer gegenüber dem Wohnbereich, abzubilden.

1.4 Planung

Der Startschuss für die Arbeit war am 04.09.2026. Da ein beträchtlicher Materialaufwand vorlag musste ich die Evaluation der Sensoren und der sonstigen elektronischen Komponenten vorgängig vornehmen. Da die Lieferzeiten unterschiedlich sind und z.T. drei Wochen betrugen habe ich die ganzen Bestellungen in den Sommermonaten vollzogen. Damit konnte ich gewährleisten, dass ich das benötigte Material zum angegebenen Startschuss zusammen ist. Der Bau eines Prototyp Modells aus Karton hat mir dabei sehr geholfen, um in etwa abwägen zu können, wo die Komponenten platziert werden, wie das Modell im Massstab 1:30 aussehen wird und wieviel Sperrholz und sonstiges Verbrauchsmaterial benötigt wird.



Abbildung 3 / Provisorisches Modell aus Karton im Massstab 1:30

Nebst dem, dass mein Arbeitgeber sehr kulant war, konnte ich bei geringer Arbeitsauslastung einige wertvolle Stunden zugunsten des Projekts gewinnen. Zusätzlich habe ich noch eine Woche Ferien eingeplant, um daran arbeiten zu können.

Insgesamt ist der Zeitplan neben der beruflichen Tätigkeit, dem Studium, der familiären Verpflichtung mit dem Aufwand (Bau Prototyp Modells, Bau finales Sperrholz Modell, Montage der Sensoren, Aktoren und sonstige elektronische Komponenten, Verdrahtung, löten, Programmierung, testen) sehr sportlich.

Die zeitlichen Aufwände setzen sich wie gemäss «Tabelle Arbeitsaufwand» wie folgt zusammen:

Arbeiten	**Aufwand in Stunden**
Prototyp Modell und Grundrissplan erstellen	16
Recherchieren und Informationen sammeln	32
Evaluation Sensoren, Mikrocontroller, Raspberry Pi und sonstigen elektronischen Bauteilen, Zusammenstellung des Baumaterials	40
Bestellungen und Einkauf des gesamten Materials	4.5
Finales Modell inkl. Sensoren, Mikrocontroller, Raspberry Pi, Verdrahtung mit den elektronischen Bauteilen	56
Programmierung, Raspberry Pi aufsetzen, Grafana Dashboard, InfluxDB, Node-RED Dashboard erstellen	12.5
Testung und Messungen durchführen	16.5
Dokumentation erstellen	82
Total	259.50

Tabelle 1 / Arbeitsaufwand

Dem gegenüber stehen Kosten gemäss «Tabelle Kostenaufwand»:

Kostenpunkt	Kosten in CHF
Sensoren	222.46
Mikrocontroller und Raspberry Pi 4 inkl. Zubehör	106.33
Netzteil	9.10
Übrige elektronische Bauteile	83.98
Verbindungskabel und Stecker	157.50
Sperrholzplatten, Leisten und Kabelkanäle	70.31
Verbrauchs- und Installationsmaterial	77.94
Versandkosten	85.68
MwSt.	65.85
Total	879.15

Tabelle 2 / Kostenaufwand

1.5 Zeitplan (Gant-Diagramm)

Beim Zeitplanungsdiagramm ist gut zu erkennen, dass alle Arbeiten erfolgreich und termingerecht abgeschlossen wurden. Meilensteine sind einerseits die Themeneingabe, finales Modell fertiggestellt ohne Sensoren, Aktoren, Modell fertiggestellt mit Sensoren, Aktoren, etc., erster Testlauf erfolgreich ohne Dashboard, zweiter Testlauf inkl. Grafana, InfluxDB erfolgreich, Abgabe Diplomarbeit 02.11.2026, Präsentation Diplomarbeit 14.11.2026. Als Verzögerung bin ich Krankheitshalber ausgefallen und musste dies entsprechend aufholen.

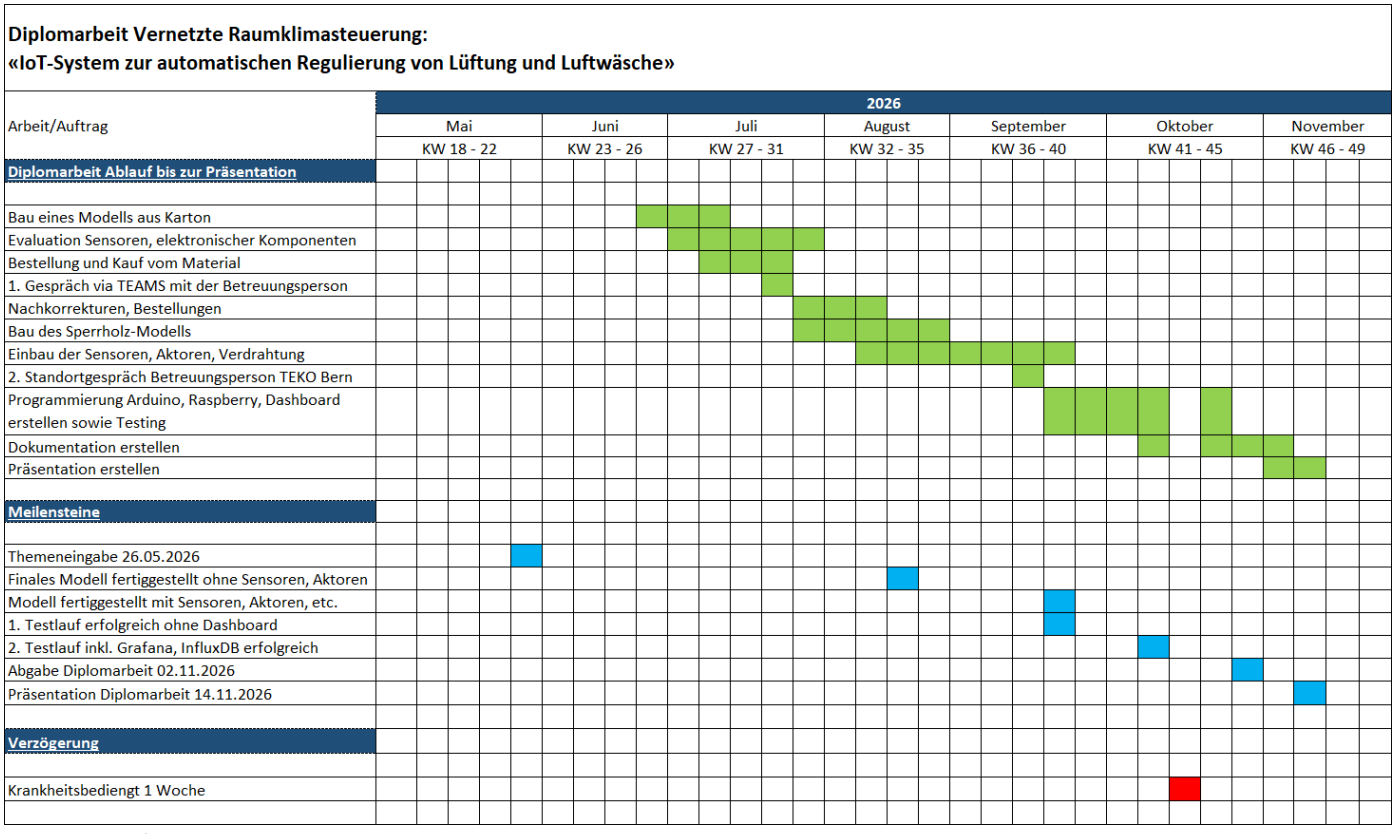


Abbildung 4 / Zeitplanungsdiagramm

2 Hauptteil

2.1 Vorgehen

Im Studium wurde uns gelernt, wie ein strukturiertes Vorgehen in einem Projekt vonstattengeht. Mit der Themeneingabe habe ich mich rein theoretisch mit dem Thema, den Zielen und mit dem groben Systemaufbau befasst. Die Evaluation der Sensoren musste ich beim ersten Standortgespräch, noch vor dem Start der Diplomarbeit nachholen und ergänzen. Der vorgegebene Zeitplan von gut zwei Monaten lässt nicht viel Spielraum zu, umso mehr war es wichtig das Material frühzeitig zu evaluieren und zu bestellen. Anhang A Themeneingabe



Abbildung 5 / Provisorisches Modell aus Karton im Massstab 1:30

Um eine Vorstellung zu haben, wie in etwa das Modell aussehen soll, wo genau die Komponenten platziert werden, wie umfangreich ist die Verdrahtung und wie die Grösse des Modells wirkt, habe ich ein provisorisches Modell, anhand des Grundrissplans der Wohnung meiner Partnerin, aus Karton im Massstab 1:30 gefertigt. Damit war es mir möglich einen besseren Überblick über die Raumaufteilung sowie des gesamten Ausmasses des Modells und somit über die Menge der Arbeit.

Das Thema Nachhaltigkeit wurde ebenfalls berücksichtigt. Die Evaluation der Komponenten, sowie das Material wurden auf ihre Lieferketten wie Ursprungsland und Produktionsstandort ausgewählt. Wenn möglich habe ich immer den Standort Schweiz oder Europa bevorzugt. Das Modell ist so gebaut, dass die verbauten Komponenten wieder verwendet werden können, ohne dass sie beim Ausbau beschädigt werden. In den nächsten Kapiteln werden die einzelnen Arbeitsschritte genauer ausgeführt.

2.1.1 Anforderungen und Systemkonzept

Anforderungen

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung und der Aufbau eines vernetzten Raumklima-Überwachungssystems. An einem massstabsgetreuen Modell im Massstab 1:30 wird gezeigt, wie Sensordaten zur bedarfsgerechten Steuerung einer modellhaften Komfortlüftung und von Luftwäschern verwendet werden können. Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, CO_2, Feinstaub und VOC werden erfasst. Der Arduino übernimmt die lokale Messwerterfassung und Regelung. Ein Raspberry Pi speichert die Messwerte und stellt sie für Visualisierung und Analyse bereit. Die Temperatur wird überwacht, aber nicht aktiv geregelt, da das Modell keine Heizungsregelung enthält. Die Ziele sind wie folgt respektive gemäss «Tabelle Zielsetzung und Umsetzung» umgesetzt.

Ziel aus der Themeneingabe	Umsetzung im Projekt	Nachweis zu erbringen
Muss: Messgrössen erfassen und Lüftung/Luftwäscher automatisch ansteuern	Arduino liest Sensoren, berechnet Prototyp-Lüfterstufen und steuert drei Lüfter sowie RGB-LEDs	Funktionsnachweise der einzelnen Schwellen und Sensorreaktionen
Muss: Demonstrationsmodell im Massstab 1:30 aufbauen und dokumentieren	Modell mit Wohn- und Schlafzimmer sowie zentralem Frischluftkanal; Sperrholzaufbau gemäss Projektunterlagen	Beschriftete Gesamt- und Detailfotos sowie Massstabs-/Abmessungsnachweis einfügen
Kann: Daten über Raspberry Pi in InfluxDB speichern und mit Grafana visualisieren	Serielle Arduino-Bridge, InfluxDB und Grafana sind eingerichtet; Messwerte werden gespeichert und dargestellt	Screenshots und repräsentative Zeitreihen einfügen
Kann: Das Modell auf drei Räume mit unterschiedlichen Prioritäten abbilden	Zwei Räume haben eigene Sensoren, Lüfter und Statusanzeigen; der Zentrallüfter berücksichtigt den höchsten	Prüfen und anhand eines Tests belegen, ob die gewünschte Priorisierung im Modell nachvollziehbar gezeigt wird.

Tabelle 3 / Zielsetzung und Umsetzung

Systemkonzept

Die Systemarchitektur trennt die lokale Erfassung und Regelung der Raumklimawerte von deren zentraler Speicherung, Bedienung und Visualisierung. Ein Arduino übernimmt autark die Sensorabfrage, die Messwertauswertung sowie die Ansteuerung der Lüfter und Status-LEDs. Durch diese Entkopplung bleibt die Kernregelung selbst bei Ausfällen von Netzwerk, MQTT oder Datenbank voll funktionsfähig.

Der Raspberry Pi übernimmt die übergeordneten Aufgaben. Er empfängt die Daten seriell via USB, speichert sie in einer InfluxDB und visualisiert sie als Zeitreihen in Grafana. Der Datenaustausch für Bedienbefehle und Statusmeldungen zwischen Node-RED und der seriellen Schnittstelle wird über MQTT abgewickelt. Anhang E Systemarchitektur

Die Systemstruktur gliedert sich in einer klassischen Automatisierungsarchitektur in drei Ebenen:

- Feldebene: Bildet die physische Schnittstelle zur Umgebung. Sensoren erfassen CO_2, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Feinstaub, VOC-Index sowie den Filterdifferenzdruck. Lüfter setzen Steuerbefehle in eine modellhafte Luftbewegung um, während RGB-LEDs die aktuelle Lüfterstufe direkt am Modell anzeigen.
- Steuerungsebene: Der Arduino verknüpft Sensorik und Aktorik. Er liest die Umweltdaten ein, berechnet regelbasiert die Lüfterstufe und steuert die Lüfter über MOSFET-Module an. Gleichzeitig aktualisiert er die LED-Anzeigen, überträgt Messwerte an den Raspberry Pi und verarbeitet Befehle zur Filterüberwachung.
- Managementebene: Dient der Datenaufbereitung, -speicherung und Benutzerinteraktion. Der Raspberry Pi stellt hierfür InfluxDB, Grafana, Mosquitto (MQTT) und Node-RED bereit. Diese Ebene ermöglicht die Analyse von Messwertverläufen sowie die Bedienung der Filterüberwachung, greift jedoch nicht in die Regelung ein.

2.1.2 Komponentenwahl

Die Komponenten wurden anhand der Messaufgabe, der erforderlichen Schnittstellen, der Versorgungsspannung, der I²C-Adressen und der verfügbaren Datenblattwerte ausgewählt. Zwei SCD-41 erfassen CO_2 in den Modellräumen. Drei SEN54 erfassen Raum- und Zuluftwerte. Die zwei DFRobot-Fermion-ENS160+BME280-Kombiboards messen den Druck vor und nach dem Filter; die darauf vorhandenen ENS160-Funktionen werden in der aktuellen Firmware nicht verwendet. Ein Multiplexer TCA9548A trennt Sensoren mit gleicher I²C-Adresse auf eigene Kanäle. Die beiden BME280 auf dem Kombiboard verwenden einen separaten bidirektionalen Logic-Level-Converter weil der Sensor mit 3,3V Signalen funktioniert aber der Arduino mit einer 5V – Logik an den Pins arbeitet.

Um Transportwege kurz zu halten und europäische Qualitäts- sowie Umweltstandards zu unterstützen, wurde bei der Auswahl der Halbleiter und Sensoren konsequent auf Entwicklung, Produktion oder Endmontage in der Schweiz und Europa gesetzt. Wo dies aufgrund der globalen Marktstruktur für Entwicklungsboards (Breakouts) nicht vollständig möglich war, wurde auf transparente Lieferketten und renommierte westliche Distributoren (wie Adafruit oder DFRobot) zurückgegriffen.

Die folgende Tabelle zeigt die Abgrenzung der Kernkomponenten anhand technologischen und geografischen Entscheidungskriterien der gewählten Sensoren im Vergleich zu verworfenen Alternativen.

Komponente	Gewählte Option	Technologische Abgrenzung / Vorteil	Nachhaltigkeit und Lieferkette	Verworfene Alternative und Begründung
CO_2-Sensor	Sensirion SCD-41 (auf Adafruit Breakout)	Echte NDIR-Messung (photoakustisch): Liefert absolute, physikalische Werte. Hohe Genauigkeit [±(50 ppm + 2.5 %)]	Schweiz: Kernsensor entwickelt und produziert von Sensirion in Stäfa (CH)	eCO_2-Sensoren (z. B. ENS160): Verworfen, da eCO_2 nur ein mathematisch geschätzter Indikator aus VOC-Werten ist und für Raumluftregelungen zu ungenau agiert
Raumklima & Feinstaub	Sensirion SEN54	All-in-One-Vielseitigkeit: Liefert Partikelmasse (PM), Temp, rF und VOC-Index vorkalibriert über ein einziges I²C-Interface	Schweiz: Spitzen-Umweltsensorik entwickelt und gefertigt in der Schweiz (Sensirion)	Diskrete Einzelsensoren (z. B. DHT22 + separate PM-Sensoren): Verworfen wegen hohem Verdrahtungsaufwand und schlechterer Langzeitstabilität
Filterdruck-Überwachung	Bosch BME280 (auf DFRobot Kombiboard)	Hohe relative Genauigkeit (±0.12 hPa): Ermöglicht die hochpräzise Erfassung minimaler Druckdifferenzen	Deutschland/Europa: Sensorelement entwickelt und gefertigt von Bosch Sensortec (DE)	Dedizierte Differenzdrucksensoren: Verworfen aufgrund mangelnder Verfügbarkeit im Prototypen-Segment und deutlich höherer Kosten

Tabelle 4 / Abgrenzung Kernkomponenten

Die Detaillierte Spezifikation der eingesetzten Komponenten sieht wie folgt aus:

Bereich	Komponente	Spezifikation und Schnittstelle	Funktion im System
Mikrocontroller	Arduino UNO R4 WiFi	Renesas RA4M1 (32-Bit ARM Cortex-M4), I²C-Master, PWM	Lokale Regelung, selbstständige Sensorabfrage, serielle USB-Kommunikation
Server	Raspberry Pi 4 (2 GB RAM)	Raspberry Pi, OS Lite 64-bit, microSD-Karte	Datenagglomeration (InfluxDB, Grafana, Mosquitto MQTT, Node-RED)
CO_2-Sensorik	2 × Adafruit SCD-41	Photoakustisch, I²C (Fixadresse 0x62), 5V-kompatibel	Erfassung der CO_2-Konzentration in den Modellräumen (Wohn-/Schlafzimmer)
Klima & Zuluft	3 × Sensirion SEN54	Optisch/Widerstand, I²C (Fixadresse 0x64), 5V	Messung von PM, Temp., rF und VOC-Index in Wohnraum, Schlafzimmer und Frischluft
Filterdruck	2 × DFRobot Fermion ENS160+BME280	Barometrisch, I²C (0x76 / 0x77 via Lötbrücke), 3,3V Signallevel	Prototypische Filterüberwachung mittels Differenzdruck-Ermittlung (ENS160 inaktiv)
Bus-Management	Multiplexer TCA9548A	8-Kanal-I²C-Schalter, I²C-Adresse 0x70, 5V	Physikalische Kanaltrennung für baugleiche I²C-Adressen (SCD-41 und SEN54)
Pegelwandlung	2-Channel Logic-Level-Converter	Bidirektional, MOSFET-basiert (Purecrea / SparkFun-Design)	Spannungsanpassung der I²C-Leitungen zwischen Arduino (5V) und BME280 (3,3V)
Aktoren	3 × Sunon Lüfter / 3 × Whadda VMA411	5V DC / IRF520 MOSFET-Treiber	PWM-gesteuerte Ventilationsregelung
Statusanzeige	3 × Iduino SE010	RGB-LED (Common Cathode)	Visuelle Statussignalisierung der Lüfterstufen
Energieversorgung	MEAN WELL RS-15-5	Schaltnetzteil, 5V DC, 3A (Hauptbus) / Separates Pi-Netzteil	Stabile, Spannungsversorgung des Gesamtsystems

Tabelle 5 / Detaillierte Komponentenwahl

Arduino UNO R4 WiFi



Abbildung 6 / Arduino UNO R4 Wifi

Der Arduino übernimmt Sensorabfrage und Regelung unabhängig von Netzwerk- oder Serverdiensten. Seine I²C-Schnittstelle wird für Multiplexer und Sensoren verwendet, drei Ausgänge steuern die Lüftertreiber per PWM. Die USB-Verbindung zum Raspberry Pi dient zugleich der Arduino-Versorgung und dem seriellen Datenaustausch. Das WLAN des UNO R4 WiFi wird für das Erfassen und Übertragen der Messdaten nicht genutzt.(Arduino, 2026)

Raspberry Pi 4

Der Raspberry Pi 4 (2 GB) übernimmt serielle Datenannahme, InfluxDB, Grafana, Mosquitto und Node-RED. Er läuft ohne lokale Desktop-Oberfläche mit Raspberry Pi OS Lite. Aktuell verwendet der Raspberry Pi eine microSD-Karte, eine SSD ist eine mögliche Erweiterung und kein Bestandteil des aufgebauten Systems.(Raspberry Pi, 2024)



Abbildung 7 / Raspberry Pi 4 2GB

CO_2-Messung (Sensirion / Adafruit SCD-41)

Die Entscheidung fiel auf den in der Schweiz entwickelten und produzierten Sensirion SCD-41. Im Gegensatz zu günstigen VOC-Sensoren, die Kohlendioxid-Äquivalente (eCO_2) lediglich über mathematische Berechnungen schätzen, nutzt der SCD-41 ein echtes photoakustisches NDIR (PA)-Messverfahren. Dies ist für mein Projekt exakter und präziser, da eCO_2-Schätzungen durch andere Haushaltsgase verfälscht werden. Das Adafruit-Board ist laut beigefügtem Produktblatt für 3,3–5V vorgesehen und enthält Spannungsregelung sowie Pegelanpassung.(Adafruit, 2026)



Abbildung 8 / SCD-41 Sensor von Adafruit

Das SCD4x-Datenblatt spezifiziert für den SCD-41 eine CO_2-Messgenauigkeit abhängig vom Konzentrationsbereich: ±(50ppm + 2,5% des Messwerts) von 400–1000ppm, ±(50ppm + 3%) von 1001–2000ppm und ±(40ppm + 5%) von 2001–5000ppm. Im Projekt werden die CO_2-Werte ausgewertet, die Temperatur- und Feuchteausgänge der SCD-41 werden nicht ausgewertet, da dafür SEN54-Werte genutzt werden.(Sensirion AG, 2024)

Die Firmware überträgt Messdaten im 10 Sekunden Zyklus. Das ist die Abtast-/Übertragungsrate des Systems und nicht gleichbedeutend mit einer 10-Sekunden-Reaktionszeit des Sensors, das Datenblatt nennt für einen CO_2 Sprung von 400 auf 2000ppm eine typische Reaktionszeit von 60 s.

Messprinzip CO_2

Das Messprinzip ist Photoakustische nach Sensirions NDIR (PA) verfahren.
PA nutzt eine gepulste IR-Lichtquelle, die Wellenlängen emittiert, die von CO_2 absorbiert werden. Die Absorption des Lichts durch CO_2-Moleküle führt zu zusätzlicher molekularer Vibration, wodurch der Druck in der Messzelle steigt. Da die Lichtquelle gepulst ist, tritt dieser Druckanstieg periodisch auf und erzeugt eine akustische Welle. Je mehr CO_2-Moleküle vorhanden sind, desto grösser ist die Amplitude der akustischen Welle. Diese wird von einem Mikrofon erfasst, um die CO_2-Konzentration zu berechnen.(Sensirion AG, 2026b)

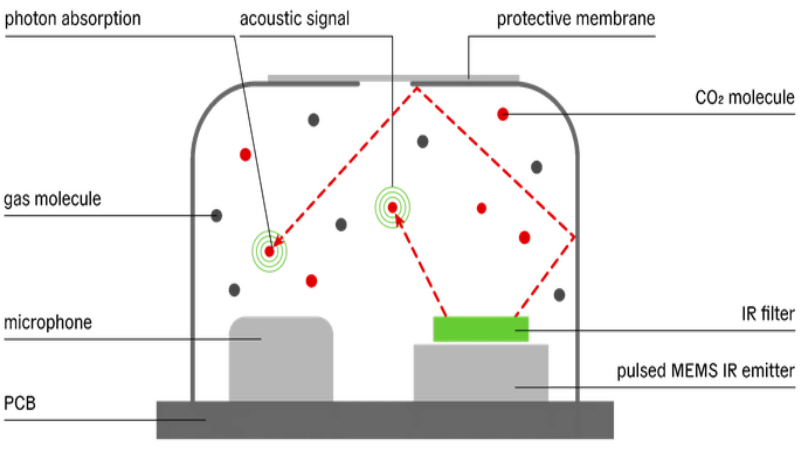


Abbildung 9 / Messprinzip CO2 von Sensirion

Raumklima- und Zuluftmessung (Sensirion SEN54)

Mit dem Sensirion SEN54 wird ein weiteres in der Schweiz gefertigtes Spitzenprodukt eingesetzt. Es liefert neben der Temperatur und relativen Feuchte auch Partikelmassenkonzentrationen (Feinstaub) sowie einen VOC-Index. Der VOC-Index (1–500) ist ein relativer Index und keine absolute VOC-Konzentration in ppm. Damit ergänzen die SEN54 die CO_2-Messung der SCD-41 um weitere für die Prototypregelung verwendete Messgrössen.(Sensirion AG, 2026a)



Abbildung 10 / SEN54 Sensor von Sensirion

Das SEN54-Datenblatt nennt 4,5–5,5V Versorgung, I²C-Adresse 0x69 und maximal 100 kbit/s. SCL und SDA sind Open-Drain, externe Pull-up-Widerstände (10 kΩ) werden empfohlen. SEL muss vor oder beim Einschalten auf GND liegen, um I²C auszuwählen. Die drei Sensoren mit identischer Adresse werden auf getrennten Kanälen betrieben. Für den SEN54 liegt der mittlere Strom im Messbetrieb laut Datenblatt bei maximal 100mA während der ersten 60 Sekunden und maximal 80 mA danach, der separate Spitzenwert bis 110mA ist als 16µs-Impuls spezifiziert.(Sensirion AG, 2026b)

Messprinzip Feuchte / Temperatur

Sensirions relative Feuchtesensoren basieren auf einem kapazitiven Messprinzip. Dabei besteht das Sensorelement aus einem Kondensator, dessen Dielektrikum aus einem Polymer besteht. Dieses nimmt proportional zur relativen Umgebungsfeuchte Wasser auf oder gibt dieses wieder ab. Durch die dadurch geänderte Dielektrizitätskonstante ändert sich die Kapazität des Kondensators, welche mit einer elektronischen Schaltung gemessen werden kann. Die Temperaturmessung wird durch bipolar Transistoren ermöglicht.

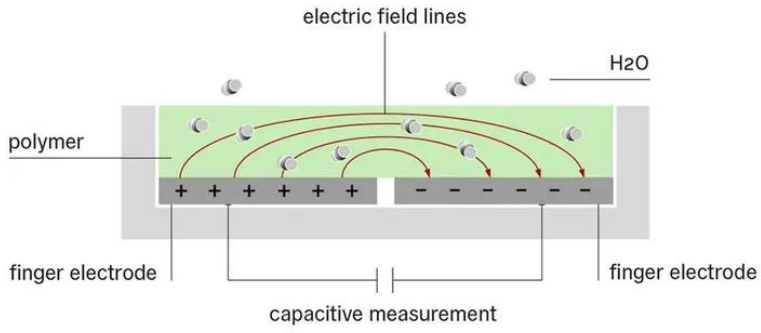


Abbildung 11 / Messprinzip Temperatur und Luftfeuchtigkeit von Sensirion

Der Temperatursensor bildet zusammen mit dem Feuchtesensor eine Einheit. Dies ermöglicht eine zusätzliche präzise Bestimmung des Taupunktes, ohne Fehler durch zwei räumlich getrennte Messsignale in Kauf nehmen zu müssen. Auf einer Fläche von wenigen Quadratmillimetern gelingt mit der CMOSens® Technologie die Verknüpfung der Sensorelemente mit der Signalverstärkereinheit, der Analog-Digital-Wandlung, dem Kalibrationsdatenspeicher sowie der digitalen, busfähigen Schnittstelle. Und dies in einem Gehäuse, das mit standardisierter Oberflächenmontage bestückt werden kann.(Sensirion AG, 2026b)

Chemoresistives Messprinzip VOC.

Metalloxid-Sensoren basieren auf einem Film aus Metalloxidpartikeln zwischen zwei Elektroden, die auf einem Heizelement aufgebracht sind. Beim Erwärmen werden negativ geladene Sauerstoffspezies erzeugt, die an der Metalloxidoberfläche absorbiert werden und dort mit den Zielgasen der Umgebung reagieren. Dabei werden Elektronen im Metalloxidfilm freigesetzt, wodurch sich der elektrische Widerstand der Metalloxidschicht ändert. Die Änderung des spezifischen Widerstandes wird zwischen den beiden Elektroden gemessen und hängt direkt von der umgebenden Konzentration der Zielgase ab.(Sensirion AG, 2026b)

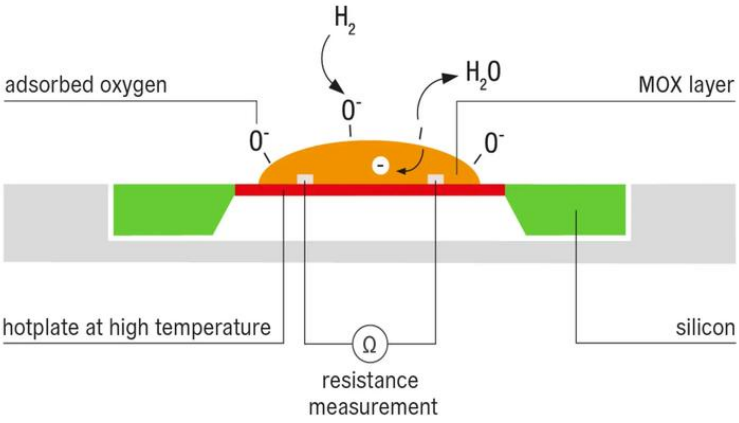


Abbildung 12 / Messprinzip VOC von Sensirion

Optisches laserbasiertes Messprinzip PM (Feinstaub)

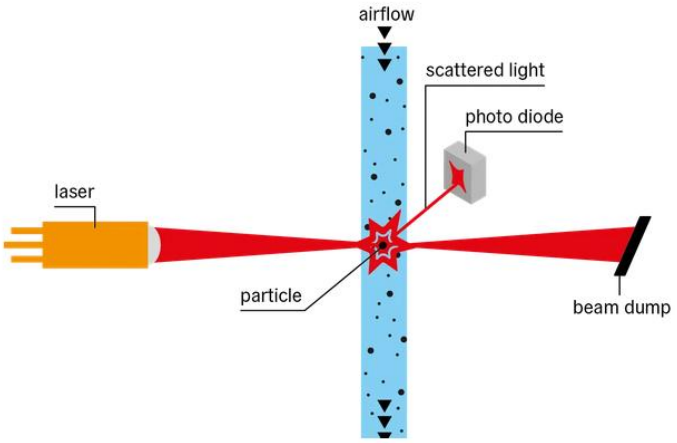


Abbildung 13 / Messprinzip Feinstaub von Sensirion

Das Messprinzip basiert auf Laserstreuung. Im Inneren des Sensors wird mithilfe eines Ventilators ein Luftstrom erzeugt. Feinstaub aus der Umgebungsluft wird durch den Luftstrom vom Einlass des Sensors bis zum Auslass getragen. In der Nähe der Fotodiode passieren die im Luftstrom enthaltenen Partikel einen fokussierten Laserstrahl und streuen dabei das Laserlicht. Dieses Streulicht wird von der Fotodiode in ein elektrisches Signal gewandelt und auf dem internen Mikrokontroller mittels Algorithmik in einen Ausgabewert für die Masse- und Anzahlkonzentration konvertiert.(Sensirion AG, 2026b)

Filterüberwachung (Bosch / DFRobot BME280)

Zur Detektion des Filterwiderstands kommen zwei DFRobot-Fermion-Kombiboards zum Einsatz, auf welchen der in Deutschland produzierte Bosch BME280 verbaut ist. Die Firmware nutzt nur die BME280-Druckmessung; die ENS160-Funktionen (TVOC/eCO_2/AQI) sind im aktuellen System nicht ausgewertet. Der BME280 misst absoluten barometrischen Druck. Der Projektwert für den Filter ist die Differenz der zwei korrigierten Messwerte, nicht eine direkte Differenzdruckmessung eines einzelnen Sensors.(DFRobot, 2026)



Abbildung 14 / ENS160+BME280 DFRobot-Fermion-Kombiboard

Die BME280-Adressen sind 0x76 und 0x77; der zweite Sensor wurde über eine Lötbrücke auf 0x77 gesetzt. Das Datenblatt nennt einen Druckbereich von 300–1100hPa und bei 25–40°C sowie 700–900hPa eine relative Druckgenauigkeit von ±0,12hPa, die absolute Genauigkeit beträgt bis zu ±1 hPa im spezifizierten Bereich. Da die Filter-Schwellen klein sind und der Test noch nicht abschliessend kalibriert ist, ist die Anzeige als prototypische Filterüberwachung zu beschreiben, nicht als validierte Filterzustandsmessung.

Das Fermion-Board ist laut Produktblatt für 3,3–5,5V vorgesehen, auf den Pins ist jedoch 3,3V angegeben. Daher ist sicherheitshalber für die Verdrahtung ein logic-Level-Converter eingebaut. Der angegebene Betriebsstrom liegt unter 20mA pro Board.

Piezoresistives Messprinzip (Barometrischer Absolutdruck)



Abbildung 15 / BME280 Sensor von Bosch

Im Inneren des Sensors befindet sich eine hauchdünne Silizium-Membran, die über einem evakuierten Hohlraum (Vakuum-Referenz) liegt. Ändert sich der Umgebungsdruck, verbiegt sich diese Membran minimal. Auf der Membran sind piezoresistive Widerstände angebracht. Durch die mechanische Dehnung oder Stauchung ändert sich deren elektrischer Widerstand (Proportional zum Druck). Diese Änderung wird elektronisch ausgewertet.(Sensortec, 2015)

Bus-Infrastruktur und Signalaufbereitung (TCA9548A und Logic-Level-Converter)

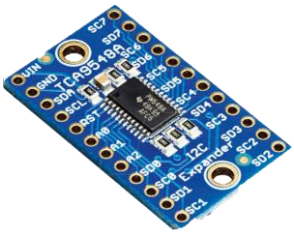


Abbildung 16 / TCA9548A Multiplexer

Der Adafruit TCA9548A I²C-Multiplexer mit Adresse 0x70 schaltet I²C-Kanäle. Er wird benötigt, weil zwei SCD-41 Sensoren dieselbe Adresse 0x62 und drei SEN54 Sensoren dieselbe Adresse 0x69 besitzen. Im dokumentierten Aufbau liegen die SCD-41 auf Kanal 0 und 1 sowie die SEN54 auf Kanal 2 bis 4. Der Multiplexer wird über VIN/GND vom MEAN WELL Haupt 5 V-Bus versorgt. Das Adafruit Dokument beschreibt Versorgung und Multiplexer Funktion, nennt aber keinen Eigenstrom. Da die genaue Stromaufnahme nicht bekannt ist, ist sie in der Leistungsbilanz nicht aufgeführt.(Adafruit, 2016; webmaster@reichelt.de, 2016)

Die beiden BME280-Drucksensoren umgehen den Multiplexer und hängen direkt parallel am Hauptbus des Arduinos. Da der Arduino mit 5V-Logikpegeln arbeitet, der BME280 jedoch eine 3,3V Architektur darstellt, ist ein bidirektionaler Logic-Level-Converter, 2-Channel 5V / 3,3V, von Purecrea (SparkFun-Design) zwischengeschaltet. Beim ausgewählten Modell ist die Dokumentation von einem SparkFun Modell abgelegt. Beim Aufbau sind für bidirektionales I²C die MOSFET-basierten TX-Pfade zu verwenden, die RX-Pfade sind Spannungsteiler und nur für eine Richtung geeignet. Das Dokument ist als „retired“ (abgekündigt) gekennzeichnet und kein Nachweis für jedes beliebige Converter-Modul. Die tatsächliche Board Beschriftung und Verdrahtung sind deshalb entscheidend.(Purecra, o. J.; Sparkfun, Electronics, o. J.)



Abbildung 17 / Logic-Level-Converter

Axiallüfter, Sunon



Abbildung 18 / Axiallüfter von Sunon

Der Aufbau verwendet drei 5V Sunon-Lüfter: zwei Sunon 30mm MF30100V1-1000U-A99 in den Modellräumen als Luftwäscher / Befeuchter und einen MF40100V1-1000U-A99 für die Frischluftzufuhr. Das 30mm-Datenblatt nennt 120mA Nennstrom und 138mA maximalen Strom pro Lüfter; für zwei Stück sind das zusammen maximal 276 mA. Für den Sunon 40mm nennt das Datenblatt 136mA Nennstrom und 157mA maximalen Strom. Damit beträgt die Summe der maximalen Lüfterströme 433mA bei 5V. Die Praxis hat gezeigt, dass die Lüfter im Versuch erst bei hohen PWM-Werten anlaufen, verwendet werden die Prototypstufen 0, 240, 247 und 255 auf den Arduino-Pins 3, 5 und 6.(Sunon, 2017b, 2017a)

VMA411-Leistungstreiber, Whadda

Drei Whadda-VMA411-Module schalten die Lüfter. Das beigefügte VMA411 Handbuch nennt einen PWM-Eingang mit 3–5 V Logik, einen Lastspannungsbereich von 0–24V, maximal 5 A Laststrom und einen erforderlichen Kühlkörper für Lasten über 1 A. Die Module enthalten IRF520-MOSFETs. Die aktuelle Steuerung nutzt drei PWM-Kanäle. Gemäss Handbuch liegen SIG, VCC und GND auf der Logikseite, VIN/GND versorgen die Lastseite und V+/V− sind als Motoranschlüsse bezeichnet. Der Eigenstrom der drei Treibermodule ist im Handbuch nicht spezifiziert.(Whadda, o. J.)

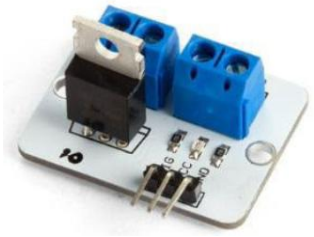


Abbildung 19 / Whadda-Leistungstreiber VMA411

RGB-LED-Module SE010, Iduino

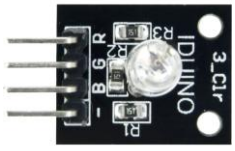


Abbildung 20 / Iduino RGB-LED Modul

Drei Iduino-SE010-Module zeigen die jeweilige Lüfterstufe. Das Produktblatt weist integrierte Vorwiderstände und separate R-, G- und B-Eingänge aus, der Anschluss „−“ ist als GND bezeichnet. Das Datenblatt nennt Helligkeitswerte bei ungefähr 20 mA. Die LEDs werden von Arduino-Ausgängen gesteuert und zählen daher zum Pi-/Arduino-Versorgungszweig, nicht automatisch zur Mean Well Last. Für die Projektlogik nutze ich für die Lüfterstufen die Farben Rot (aus), Grün (Stufe 1), Gelb (Stufe 2) und Blau (Stufe 3).(Iduino, o. J.)

Netzteile (MEAN WELL RS-15-5, offizielles Raspberry Pi) und Versorgungsaufteilung

Das MEAN WELL RS-15-5 liefert laut Hersteller 5 V bei bis zu 3 A beziehungsweise 15 W. Der spezifizierte Ausgangsspannungsbereich liegt bei 4,75–5,5 V. Es versorgt den Haupt-5-V-Bus, insbesondere die Lüfter-Leistungsseite, die SEN54, SCD-41 und den Multiplexer TCA9548A. Das offizielle Raspberry Pi-Netzteil versorgt den Raspberry Pi und über den USB-Anschluss den Arduino. Die positiven 5 V Ausgänge der beiden Netzteile bleiben getrennt. Eine gemeinsame Masse stellt den Signalbezug her.(MEAN WELL, 2022; *MEAN WELL RS-15-5 Schaltnetzteil 5 V/DC 3 A 15 W – Conrad Electronic Schweiz*, o. J.)



Abbildung 21 / Netzteil MEAN WELL RS-15-5

Im aktuellen Verdrahtungsplan sind die BME280-Boards und Logic-Level-Converter an den Arduino 3,3V /5V Pins angeschlossen, die RGB-LEDs hängen an den Arduino-Ausgängen. Diese Verbraucher gehören daher nicht in die Mean Well Summenbilanz.

Komponente / Zweig	Max. Datenblattwert / Ansatz	Anmerkung
MEAN WELL RS-15-5 (Zweig 1)	5V / 3A (15W) Nennleistung	Hauptversorgung für Lüfter und Sensorik
2× Sunon Lüfter (30mm)	276mA max.	Datenblatt-Maximum
1× Sunon Lüfter (40mm)	157mA max.	Datenblatt-Maximum
3× Luftqualitäts-Sensor SEN54	300mA (Dauer) / 330mA (Spitze)	300mA in den ersten 60s Startzeit
2× CO_2-Sensor SCD-41	34mA (Dauer) / 274mA (Spitze)	34mA im Normalbetrieb
Multiplexer, 3× Treiber	Nicht ausgewiesen	Eigenstrom von TCA9548A und VMA411 fehlt
Raspberry-Pi-Netzteil (Zweig 2)	5V / 3A (15W) Nennleistung	Versorgt Pi, Arduino (via USB) und LEDs
Raspberry Pi 4, Arduino, BME280, Logic-Level-Converter, LEDs	Nicht ausgewiesen Nur bei LEDs, leuchten ab 20mA	Verbrauch muss real gemessen werden

Tabelle 6 / Leistungsbilanz Netzteile

Daraus ergibt sich eine maximale Auslastung für das MEAN-WELL Netzteil (5V / 3A) von 25,6 % im Normalbetrieb (ca. 767mA) und 34,6 % im theoretischen Spitzenlastfall (mind. 1,037A). Somit ideal dimensioniert und bietet eine reichliche Reserve von über 11 Watt. Von diesem Puffer müssen lediglich noch die nicht spezifizierten Eigenströme des Multiplexers und der Treibermodule abgezogen werden.

Beim Raspberry-Pi-Zweig mit seinem eigenem 15-W-Netzteil (5V / 3A), der den Raspberry Pi 4 sowie via USB den Arduino mitsamt den Komponenten (BME280, Logic-Level-Converter, RGB-LEDs) versorgt, die tatsächliche Last aufgrund fehlender oder unvollständigen Datenblätter nicht zu berechnen. Daher bleibt die genaue verbleibende Reserve dieses Zweigs vorerst offen

2.2 Aufbau und Umsetzung

Wie schon in der Zielsetzung erwähnt, stand die Option auf drei Zimmer, um die Priorisierung sowie die individuelle Regelbarkeit der Luftwäscher / Befeuchter aufzuzeigen. Entscheidend war das aktuelle hohe Kostenvolumen (siehe Tabelle Kostenaufwand) sowie der zusätzliche Arbeitsaufwand für zwei weitere Zimmer. Es würden auch keine freien Pins mehr zur Verfügung stehen, um noch Anpassungen oder Ergänzungen, die im Verlauf des Projekts hätten auftreten können umzusetzen. Um der Priorisierung und der individuellen Regelbarkeit dennoch gerecht zu werden, habe ich mich für die Variante mit einem Ausbau auf zwei Zimmer entschieden. So konnte ich sicherstellen, dass alle Elemente des Projekts zum Ausdruck kommen und das Projekt termingerecht und effizient abgeschlossen werden kann.

«Die Ressource Zeit war schlussendlich ausschlaggebend»

Der Autor

2.2.1 Modell

Als Grundlage habe ich den Grundrissplan der Wohnung meiner Partnerin in einem Raumplaner nachskiziert. Anhand diesen Maasen konnte ich dann die Raumdimensionen (mit einem Zimmer weniger) im Massstab 1:30 ein Sperrholz-Modell anfertigen. Die Raumhöhe ist auf 85mm gesetzt, das Schrägdach ist rein optisch hinzugefügt.



Abbildung 22 / Ansicht Prototyp-Modell

Aufgebaut ist das Modell auf einer 350 x 350mm Sperrholz-Platte. Unter dieser Platte befindet sich die ganze Steuerungslogik, Raspberry Pi, Stromversorgung und Verdrahtung. Dies wiederum ist alles ist auf einer 450 x 350mm Grund Sperrholz-Platte aufgebaut. Damit alle Elektronik Komponenten, sowie Verdrahtung genügend Raum haben, sind auf der Fläche der Grund-Platte Dachleisten mit einer Höhe von 50mm und im Quadrat von 350 x 350mm dem Rand entlang verbaut. Lüftungsschlitze sorgen für die entsprechende Kühlung.
Anhang K Umsetzung Aufbau Komponenten und Verdrahtung

Als Frischluft- und Abluft Kanal habe ich Kabelkanäle verwendet. Der Abluft Kanal ist rein optisch und hat keinen Einfluss auf Modell, soll aber zeigen, dass die Abluft wie in der Referenz Wohnung in der Küche sowie Dusche / WC abgeführt wird. Beim Frischluft Kanal wird mit dem 40mm Sunon Lüfter die Komfortlüftung simuliert.

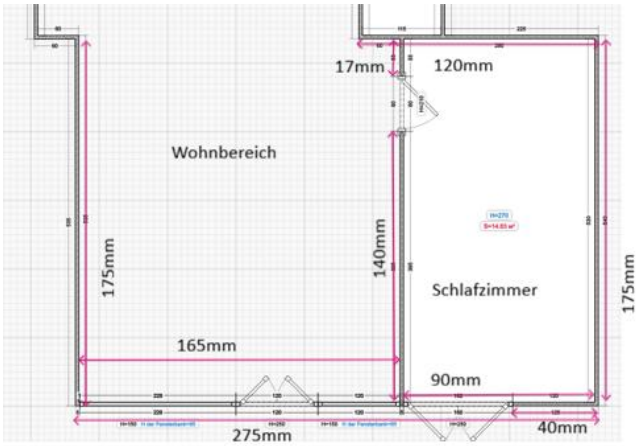


Abbildung 24 / Grundriss Wohn- und Schlafzimmer im Massstab 1:30

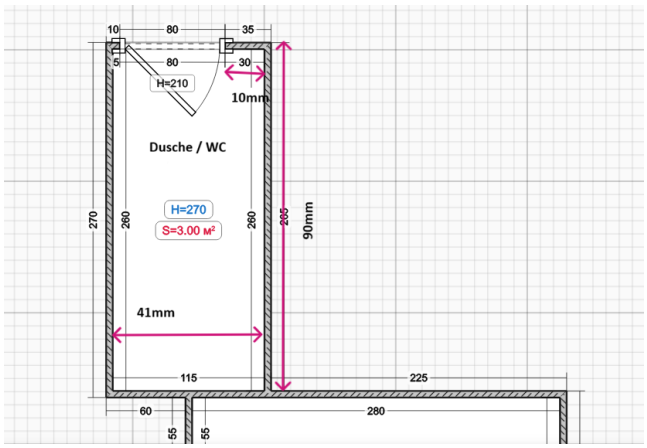


Abbildung 23 / Grundriss Dusche/WC im Massstab 1:30

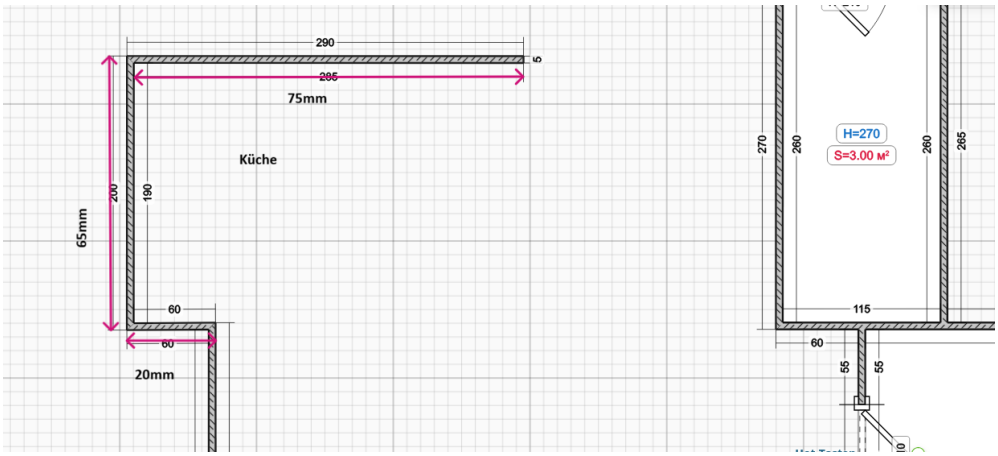


Abbildung 25 / Grundriss Küche im Massstab 1:30



Abbildung 27 / Prototyp-Modell Ansicht Front



Abbildung 26 / Prototyp-Modell Ansicht Seite links Frischluftzufuhr



Abbildung 29 / Prototyp-Modell Ansicht hinten



Abbildung 28 / Prototyp-Modell Ansicht Seite rechts



Abbildung 31 / Prototyp-Modell Ansicht oben

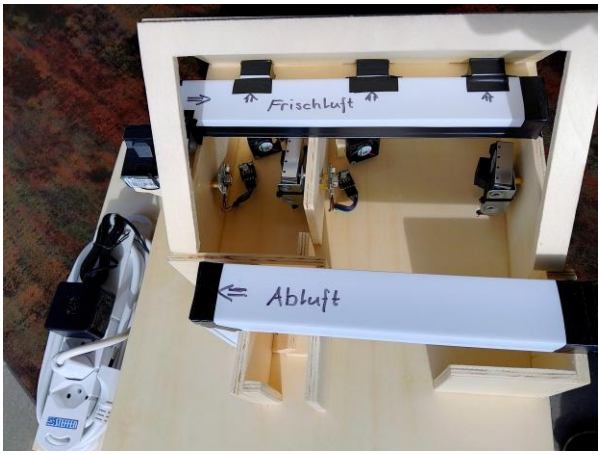


Abbildung 30 / Prototyp-Modell Ansicht oben seitlich

2.2.2 Schaltungsaufbau und Verdrahtung

Der gesamte Schaltungsaufbau basiert darauf, dass verschiedene Sensoren und Aktoren (Lüfter, LEDs) mit dem zentralen Steuerungs-Mikrocontroller (Arduino UNO R4 WiFi) kommunizieren. Um zu verstehen, wie die einzelnen Bauteile miteinander verbunden sind, lässt sich die Verdrahtung in drei Kernbereiche unterteilen, die Stromversorgung, das Daten-Bussystem (I²C) und die Lüfter- bzw. LED-Ansteuerung. Anhang D Verdrahtungsübersicht Sensorik, I2C Bus, Aktoren und LED Versorgung

Die Stromversorgung

Die Sensoren sind an den Arduino angeschlossen. Der Multiplexer TCA9548A wird vom MEAN WELL-Haupt-5V Bus versorgt, Arduino und MEAN WELL teilen die Signalmasse. Die beiden SCD-41 werden ebenfalls vom MEAN WELL-Haupt-5V Bus gespeist. SCD-41 und SEN54 liegen auf getrennten Multiplexer-Kanälen, weil die jeweiligen Geräte innerhalb einer Sensorgruppe dieselbe I²C-Adresse verwenden. Die BME280 sind parallel am Hauptbus angeschlossen und werden über den Logic-Level-Converter an die passenden I²C-Pegel angepasst. Die positiven 5V Ausgänge von Raspberry Pi Netzteil und MEAN WELL-Netzteil bleiben getrennt. Die Massen sind für den gemeinsamen Signalbezug verbunden.

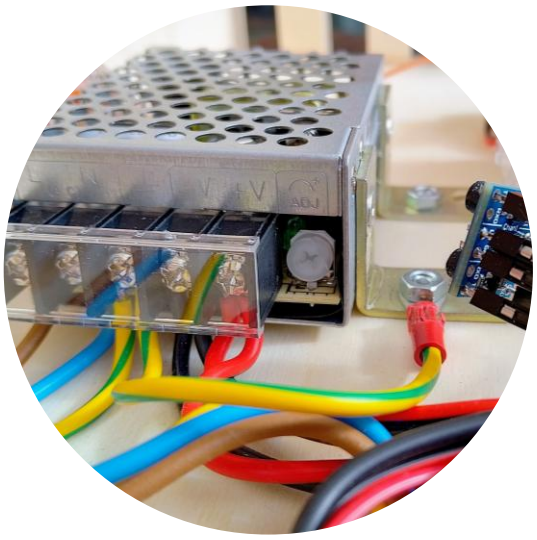


Abbildung 32 / Verdrahtung Netzteil

Die Tabelle «Verdrahtung Stromversorgung» beschreibt die Verdrahtung des aktuellen Modellaufbaus.

Von	Nach	Zweck / Hinweis
Offizielles Raspberry-Pi-Netzteil 5V / 3A	Raspberry Pi 4USB-C	Versorgung des Raspberry Pi
Raspberry Pi USB-A	Arduino UNO R4WiFi USB-C	Arduino-Versorgung und USB-Seriell-Verbindung
MEAN WELL RS-15-5V	Haupt-5V Bus	Versorgung der Lüfter-Leistungsseite und 5V Module,

		sofern deren Datenblatt 5V zulässt
MEAN WELL RS-15-5V	Haupt GND Bus	Gemeinsame Masse für MOSFETs Multiplexer und Sensorik
Arduino GND	Haupt GND Bus	Gemeinsames Bezugspotential der PWM- und I²C-Signale
Logic-Level-Converter GND (beide Seiten)	Haupt GND Bus	Gemeinsame Referenz für HV- und LV-Seite

Tabelle 7 / Verdrahtung Stromversorgung

I²C-Bus und Sensoren

Beim Verdrahten des SEN54 Sensors gibt es zwei wichtige Punkte die zu beachten sind. Das Datenblatt sagt, sowohl die SCL- als auch die SDA-Leitung sind Open-Drain-Ein-/Ausgänge (I/Os). Sie sollten mit externen Pull-up-Widerständen 10kOhm verbunden werden. Um I²C korrekt als Schnittstelle auszuwählen, muss der Schnittstellen-Auswahl Pin (SEL, Pin 5) auf Masse (GND) gezogen werden, bevor oder zur gleichen Zeit, in der der Sensor mit Strom versorgt wird.(Sensirion AG, 2022) Anhang F I2C-Topologie

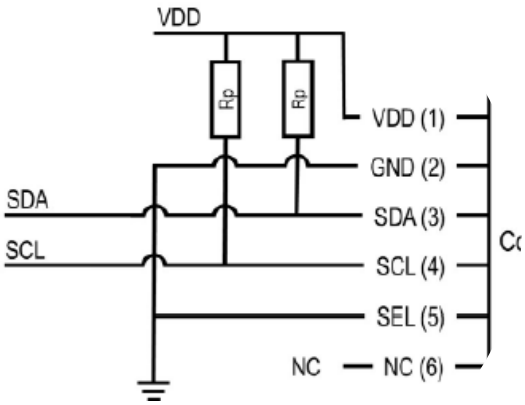


Abbildung 33 / Schema betreffend SEN54 Verdrahtung

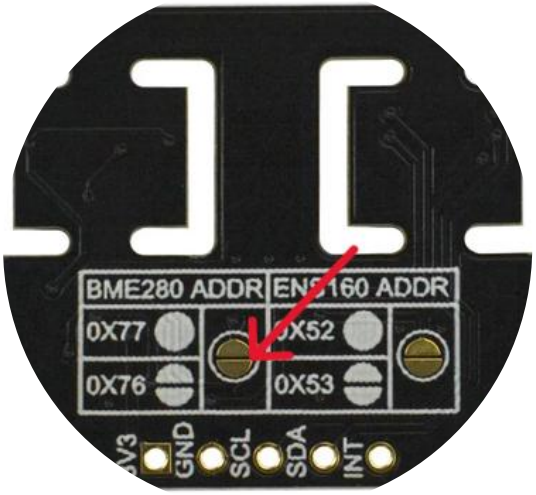


Abbildung 34 / Rückseite Fermion-Kombioard mit der Lötbrücke zur Adressänderung

Auf der Rückseite des DFRobot-Fermion-Kombiboards sind zwei Lötbrücken. Um die Adresse des BME280 von 0x76 auf 0x77 zu ändern, muss diese Lötbrücke (siehe roten Pfeil) geschlossen werden. (DFRobot, 2026)

Die Tabelle «Verdrahtung I²C Bus und Sensoren» beschreibt die Verdrahtung. Anhang F I2C-Topologie

Komponent / Pin	**Ziel / Pin**	**Anschluss / Zweck**
Arduino A4 / SDA	Multiplexer TCA9548A SDA (Master)	I²C-Datenleitung zum Multiplexer
Arduino A5 / SCL	Multiplexer TCA9548A SCL (Master)	I²C-Taktleitung zum Multiplexer
MEAN WELL RS-15-5 +V und -V	Multiplexer TCA9548A VIN und GND	Multiplexer-Versorgung über den Haupt-5V Bus; Masse gemeinsam führen

MEAN WELL RS-15-5 +V und -V	Beide SCD-41-Boards V+ und GND	Sensorversorgung mit 5V über den Haupt-5V Bus, Masse gemeinsam führen
TCA9548A Kanal SD0/SC0	SCD-41 Wohnzimmer SDA/SCL	Sensoradresse 0x62
TCA9548A Kanal SD1/SC1	SCD-41 Schlafzimmer SDA/SCL	Sensoradresse 0x62, durch eigenen MUX-Kanal konfliktfrei
TCA9548A Kanal SD2/SC2	SEN54 Wohnzimmer SDA/SCL	Sensoradresse 0x69, SEL an GND für I²C-Modus
TCA9548A Kanal SD3/SC3	SEN54 Schlafzimmer SDA/SCL	Sensoradresse 0x69, SEL an GND
TCA9548A Kanal SD4/SC4	SEN54 Frischluftkanal SDA/SCL	Sensoradresse 0x69, SEL an GND
SEN54 je Standort	Versorgung und Signale	5V an VCC, gemeinsame Masse an GND, Pull-up-Widerstände (10Kohm) auf SDA/SCL gemäss Datenblatt Sensirion
Arduino 5V, 3V3, GND	Logic-Level-Converter HV, LV, beide GND	Referenzspannungen der Pegelwandlung
Level-Shifter, bidirektionaler TX-Kanal 1	Arduino-SCL-Header HV/TXO beide BME280-SCL-Klemme LV/TXI	I²C-Takt für beide parallel angeschlossenen BME280
Level-Shifter, bidirektionaler TX-Kanal 2	Arduino-SDA-Header HV/TXO beide BME280-SDA-Klemme LV/TXI	I²C-Daten für beide parallel angeschlossenen BME280
Arduino 3V3 und GND	BME280-Boards VCC/GND	Versorgung der BME280 auf der LV-Seite.
BME280 Board 1	Lötbrücke offen	Adresse 0x76, vor dem Filter
BME280 Board 2	Lötbrücke geschlossen	Adresse 0x77, nach dem Filter

Tabelle 8 / Verdrahtung I2C Bus und Sensoren

Die BME280 hängen am selben direkten I²C-Hauptbus (physisch über den Level-Shifter) und umgehen denTCA9548A. Bei dem verwendeten SparkFun-artigen Pegelwandler werden für I²C ausschliesslich der bidirektionalen TX-Pfade benutzt, RX-Pfade, die nur als Spannungsteiler arbeiten, bleiben frei. Die ENS160-Komponenten auf den Kombi-Boards werden von der Firmware nicht ausgelesen. (Sparkfun, Electronics, o. J.)

Lüftertreiber und RGB-LEDs

Funktion	**Arduino Pin**
Zentrallüfter / (Frischluft)	3 PWM
Zimmerlüfter Schlafzimmer (Luftbefeuchter / Wäscher)	5 PWM
Zimmerlüfter Wohnzimmer (Luftbefeuchter / Wäscher)	6 PWM
RGB-LED Wohnzimmer (R/G/B)	9 / 10 / 11
RGB-LED Schlafzimmer (R/G/B)	2 / 4 / 7
RGB-LED Zentral / Frischluft (R/G/B)	8 / 12 / 13

Tabelle 9 / Ausgangs Pins Arduino

Die Lüfterstufen (PWM) laufen bei den kleinen Sunon Lüfter erst bei sehr hohen PWM-Werten an (ca. ab 240 von 255). Die Stufen liegen wie in der Tabelle «Lüfterstufen (PWM)» deshalb nahe am Maximum.

Stufe	PWM-Wert	LED-Farbe
0 (aus)	0	Rot
1	240	Grün
2	247	Gelb (Rot + Grün)
3	255	Blau

Tabelle 10 / Lüfterstufen (PWM)

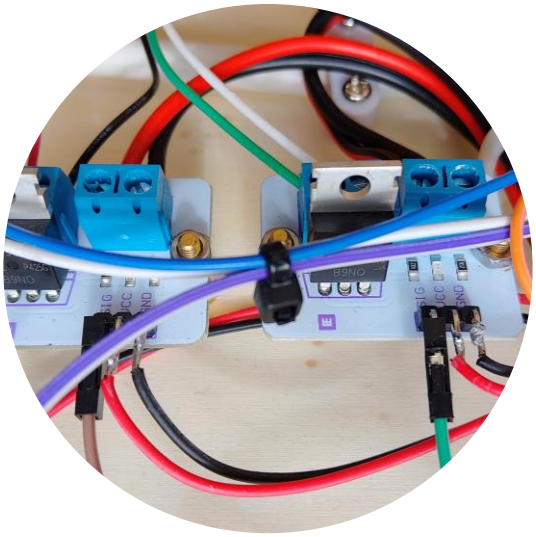


Abbildung 35 / Verdrahtung Lüftertreiber

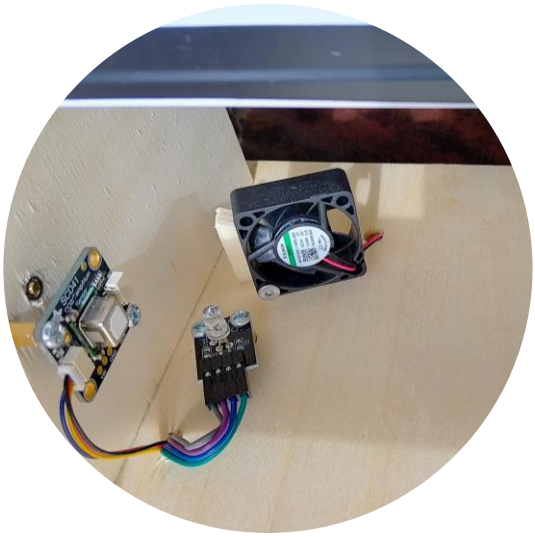


Abbildung 36 / Aufbau eines Zimmers, Lüfter, RGB-LED und SCD-41 sowie SEN54

Die Tabelle «Verdrahtung Lüftertreiber und RGB-LEDs» beschreibt das Verbinden mit den Modulen.

Von	Nach	Anschluss / Zweck
Arduino Pin 3	VMA411 Nr. 1 SIG	PWM für Zentrallüfter
Arduino Pin 5	VMA411 Nr. 2 SIG	PWM für Schlafzimmerlüfter
Arduino Pin 6	VMA411 Nr. 3 SIG	PWM für Wohnzimmerlüfter
Haupt-5V Bus / GND	Je VMA411 Logikseite VCC/GND	Versorgung und Signalbezug des Moduls
Haupt-5V Bus / GND	Je VMA411 VIN/GND (Motorversorgung)	Versorgung der Lastseite
Je VMA411 V+ / V- (Motoranschlüsse)	Zugehöriger Sunon-Lüfter +/ -	Lüfteranschluss gemäss VMA411-Handbuch, Modulbeschriftung beachten
Arduino Pins 9/10/11	RGB-Modul Wohnzimmer R/G/B	Status-LED Lüfterstufe (Luftwäscher / Befeuchter) Wohnzimmer, gemeinsame Kathode - an GND

Arduino Pins 2/4/7	RGB-Modul Schlafzimmer R/G/B	Status-LED Lüfterstufe (Luftwäscher / Befeuchter) Schlafzimmer, gemeinsame Kathode - an GND
Arduino Pins 8/12/13	RGB-Modul Zentral R/G/B	Status-LED Lüfterstufe Zentrallüfter (Frischluft), gemeinsame Kathode - an GND

Tabelle 11 / Verdrahtung Lüftertreiber und RGB-LEDs

Die Iduino-LED-Module haben integrierte Vorwiderstände. Die MOSFET-Module schalten die Lüfterlast; die Arduino-Pins führen nur die Steuersignale.

Das vorliegende Whadda Handbuch ist für den VMA411. Es nennt einen PWM-Eingang mit 3–5V Logik, eine Lastspannung von 0–24V und maximal 5A; oberhalb von 1A Laststrom ist laut Handbuch ein Kühlkörpererforderlich. Diese Maximalwerte sind keine Aussage zur tatsächlichen Lüfterlast oder Verlustleistung im Aufbau. (Whadda, o. J.)

2.2.3 Firmware und Regelungslogik

Die Firmware ist in drei PlatformIO-Umgebungen aufgeteilt, Hardwaretest (uno_r4_wifi), Datenerfassung ohne Regelung (logger) und Automatik (auto). Für den SCD-41 wird die Sensirion-Bibliothek verwendet. Der Automatik-Sketch liest die Sensoren alle zehn Sekunden, berechnet anhand der Steuerungslogik die Lüfterstufen und gibt die resultierenden Stufen 0 bis 3 aus. Die Lüfter-PWM-Werte sind 0, 240, 247 und 255. Gemäss Praxistest laufen die kleinen Lüfter erst bei hohen PWM-Werten an, die Stufen sind Prototypwerte und noch kein Nachweis für bestimmte Drehzahlen oder Luftmengen. Anhang B Firmware Umgebung

Die Raumlüfter simulieren Luftwäscher / Befeuchter. Sie reagieren auf Luftqualität und zu geringe Feuchte. Der Zentrallüfter reagiert auf den höchsten Luftqualitätsbedarf der beiden Räume, zu hohe Feuchte und eine allfällige Freigabe der Nachtkühlung. Ist ein CO_2-Messwert ungültig, wird der betreffende Raum vorsorglich auf Stufe 3 gesetzt. Temperatur und Feuchte werden zusätzlich mit Komfortbereichen von 20–24 °C beziehungsweise 40–60 % als Statuswerte ausgewertet, die Temperatur wird nicht geregelt.

Die Firmware Umgebung setzt sich wie vorhin erwähnt in drei Sketches gemäss Tabelle «Firmware Umgebungen» zusammen.

Umgebung	**Datei**	**Zweck**
uno_r4_wifi	src/main.cpp	Hardwaretest, I^2C-Scan, Sensorlesung, LED- und Lüftertest
logger	src/logger.cpp	Nur Messwerte senden; Lüfter bleiben aus
auto	src/auto_control.cpp	Automatische Regelung, Filterüberwachung, Nachtkühlung, Übertagung der Messwerte

Tabelle 12 / Firmware Umgebungen

Die Aufgaben der drei Sketches sind:

- Hardware test, main.cpp/uno_r4_wifi
  Der Test wartet, bis im Serial Monitor eine Taste gedrückt und Enter gesendet wird. Dadurch werden die ersten Diagnosemeldungen nicht vor dem Öffnen des Monitors ausgegeben. Er prüft den Multiplexer TCA9548A auf 0x70, die BME280 auf 0x76 und 0x77 sowie SCD-41 und SEN54 auf den vorgesehenen Multiplexer-Kanälen. Danach schaltet er alle RGB-LEDs durch die vier Zustände und steuert jeden Lüfter einzeln mit PWM240, 247 und 255 für jeweils drei Sekunden an. Dieser Sketch ist ein manueller Funktionstest. Er enthält keine laufende Sensorregelung, nach dem Test werden die Lüfter wieder ausgeschaltet.
- Logger, logger.cpp / logger
  Initialisiert die Sensoren und liest sie alle zehn Sekunden. Sendet die Messwerte als eine JSON-Zeile über USB-Serial an die Python-Bridge auf dem Raspberry Pi. Hält die Lüfter ausgeschaltet und setzt die Status-LEDs auf Rot. Dieser Sketch dient der Datenerfassung, nicht der Regelung.
- Automatik, auto_control.cpp / auto
  Ist der vorgesehene Betriebs-Sketch. Er liest die Sensoren alle zehn Sekunden, berechnet Lüfterstufen und steuert die drei Lüfter sowie die RGB-LEDs. Enthält die CO_2-, VOC-, PM- und Feuchteregelung, den zuschaltbaren Filterstatus anhand des BME280-Differenzdrucks sowie die Nachtkühlungslogik. Sendet weiterhin JSON-Messwerte an die Bridge, startet nach jedem Reset in AUTO.

Nebst der Sensirion Bibliothek für den SCD-41 sind weitere Bibliotheken wie die Adafruit BME280 Library und Sensirion I2C SEN5x installiert.

Schwellen Regelungslogik

Die CO_2-Grenzen orientieren sich an den BAG-Empfehlungen. Für Feinstaub nennt die Schweizer Luftreinhalte-Verordnung (LRV, Anhang 7) Immissionsgrenzwerte von 10 µg/m³ PM2.5 und 20 µg/m³ PM10. Beide Werte sind arithmetische Jahresmittelwerte der Aussenluft, für PM10 gilt zusätzlich ein 24-Stunden-Mittelwertvon 50 µg/m³, der höchstens dreimal pro Jahr überschritten werden darf. Sie sind daher keine unmittelbaren Grenzwerte für einzelne 10-Sekunden-Messungen des SEN54 in einem Innenraum-Modell. Die bestehenden Lüfterstufen bleiben separat kalibrierte Prototyp-Regelschwellen. (BAFU, 2024)

Die Stufen 1 bis 3 sind Bedarfsstufen, keine getrennten Gerätemodi. Die Tabelle zeigt deshalb zusätzlich, welches Gerät auf den jeweiligen Bedarf reagiert. Luftwäscher sind hier die durch die Raumlüfter simulierten Venta-Geräte, sie reinigen die Raumluft und befeuchten sie. Die Komfortlüftung ist der Zentrallüfter, der Frischluft zuführt. Bei den Luftqualitätsschwellen reagieren beide Systeme, bei zu trockener Luft nur die Luftwäscher und bei zu feuchter Luft nur die Komfortlüftung. Anhang C Diagramm Regelungslogik

Die Regelungslogik funktioniert gemäss Tabelle «Regelungslogik Raumklima».

Messgrösse	**Aktor Wirkung**	**Stufe 1**	**Stufe 2**	**Stufe 3**	**Einordnung**
CO_2 (ppm)	Luftwäscher (Raumlüfter) und Komfortlüftung (Zentrallüfter)	> 1000ppm	> 1200ppm	> 1400ppm	An BAG-Empfehlungen orientiert, Zwischenstufen sind

					Prototypfestlegungen
VOC-Index	Luftwäscher (Raumlüfter) und Komfortlüftung (Zentrallüfter)	≥ 150	≥ 200	≥ 300	Prototypschwellen, VOC-Index ist kein ppm-Messwert
PM2.5 (µg/m³)	Luftwäscher (Raumlüfter) und Komfortlüftung (Zentrallüfter)	≥ 15µg/m³	≥ 25µg/m³	≥ 35µg/m³	Prototypschwellen, nicht mit LRV-Jahresmittelwerten 10 µg/m³ gleichzusetzen
PM10 (µg/m³)	Luftwäscher (Raumlüfter) und Komfortlüftung (Zentrallüfter)	≥ 45µg/m³	≥ 75µg/m³	≥ 100µg/m³	Prototypschwellen, nicht mit LRV-Jahresmittelwerten 20 µg/m³ gleichzusetzen
Relative Feuchte, zu trocken	Luftwäscher (Raumlüfter) Befeuchtung	< 45 %	< 40 %	< 35 %	Prototypschwellen Befeuchtungsbedarf endet ab 50 %
Relative Feuchte, zu feucht	Komfortlüftung (Zentrallüfter), Frischluftzufuhr	≥ 55 %	≥ 60 %	≥ 65 %	Prototypschwelle

Tabelle 13 / Rgelungslogik Raumklima

Feuchteregelung im Detail

Die Raumlüfter simulieren Venta-Luftwäscher, die Luft reinigen und gleichzeitig befeuchten. Die Feuchte wird deshalb getrennt vom Luftqualitätsbedarf bewertet:

- Befeuchten: Unter 45 % rF läuft der Raumlüfter mindestens in Stufe 1. Reicht das nicht, steigt die Stufe bei unter 40 % (Stufe 2) und unter 35 % (Stufe 3).
- Ausschalten: Ab 50 % rF entfällt der Befeuchtungsbedarf. Zwischen 45 % und 50 % wird kein neuer Bedarf erzeugt. Daraus ergibt sich eine Schaltdifferenz von 5 %, das ständige Ein- und Ausschalten um einen einzelnen Schwellenwert vermeidet.
- Zu feucht: Ab 55 % rF erhöht der Zentrallüfter die Frischluftzufuhr (Stufe 1), ab 60 % Stufe 2, ab 65 %Stufe 3. 55 % dient damit auch als Sicherheitsgrenze gegen Kondensation und Schimmelrisiko. Eine Abschaltgrenze von 55 % für die Befeuchtung wurde verworfen, weil die Feuchte nach dem Abschalten noch nachsteigen kann.
- Priorität der Luftqualität: Die Raumlüfterstufe ist das Maximum aus Luftqualitäts- und Befeuchtungsbedarf. Ab 50 % rF läuft ein Raumlüfter bei schlechter Luftqualität deshalb weiter. Der Zentrallüfter ist das Maximum aus dem Luftqualitätsbedarf beider Räume und dem Feuchtebedarf (zu feucht).
- Ungültiger SEN54-Wert: Es entsteht kein Feuchtebedarf; die Feuchte wird nicht als 0 % interpretiert.

Die Regelung hat bewusst keine Zeitverzögerung (Mindestlaufzeit) und keine Verlaufsauswertung. Die Stufenergeben sich allein aus dem aktuellen Messwert alle 10 Sekunden. Eine Mindestlaufzeit oder verzögerte Stufenerhöhung wäre eine mögliche Erweiterung. Diese Werte beschreiben die implementierte Prototypregelung und sind keine gesetzlichen Innenraumgrenzwerte.

VOC-Index

Der SEN54 liefert einen verarbeiteten VOC-Index von 0 bis 500. Der Index ist relativ und keine VOC-Konzentration in ppm. Der Wert 100 dient als typischer Referenzwert des lernenden Algorithmus; Werte darüber zeigen eine Verschlechterung relativ zur erlernten Hintergrundbelastung, tiefere Werte eine Verbesserung. Sensirion gibt für den SEN54 eine Einschaltzeit von rund einer Stunde an; VOC-Werte unmittelbar nach dem Start sind deshalb nicht als stabiler Referenzzustand zu behandeln. (Sensirion AG, o. J.-a)

Filterüberwachung

Die Filterüberwachung berechnet filter_dp_hpa = druck_vor_filter − druck_nach_filter. Der Filterstatus ist separat schaltbar und beeinflusst die Lüfterregelung nicht. Bei eingeschalteter Überwachung bedeutet Status 1 „in Ordnung“, Status 2 „bald ersetzen“ ab 0,3 hPa, Status 3 „verstopft/ersetzen“ ab 0,5 hPa und Status 4 einen BME280-Messfehler; Status 0 bedeutet ausgeschaltet. Die Werte 0,3 und 0,5 hPa sind Modellschwellen und am Aufbau noch zu validieren.Anhang G Diagramm Filterüberwachung (Differenzdruck)

Die BME280 wurden am 12.10.2026 mit einer Einpunkt-Offsetkorrektur gegen einen Referenzdruck von 950,0 hPa (QFE) abgeglichen. Der Offset beträgt −7,40 hPa für den Sensor vor und −7,72 hPa für den Sensor nachdem Filter. Nach dem erneuten Hochladen zeigten beide Sensoren rund 950,00 hPa. Der Abgleich korrigiert den Offset am Referenzpunkt, belegt aber weder die Genauigkeit über den gesamten Messbereich noch die Eignung der kleinen Filterstatusschwellen.

Nachtkühlung

Die Nachtkühlung benötigt keinen Echtzeituhren-Baustein. Eine Freigabe wird erst nach einem gemerkten Hitzetag erteilt. Die Frischlufttemperatur muss zuvor mindestens 30 °C erreicht haben, der Merker gilt 24 Stunden. Zum Einschalten müssen die Raumtemperatur mindestens 24 °C, die Frischlufttemperatur unter 20 °C, der Temperaturunterschied mindestens 2 K und die Zuluft unauffällig sein. Beim Unterschreiten der Abschaltgrenzen (Raum unter 23 °C, Frischluft ab 21 °C, Unterschied unter 1 K oder belastete Zuluft) wird abgeschaltet. Der Zentrallüfter läuft während der Nachtkühlung je nach Temperaturunterschied auf Stufe 1, 2 oder 3.Anhang H Diagramm Nachtkühlung

2.2.4 Raspberry Pi, Kommunikation und Datenpfad

Der Raspberry Pi 4 mit 2 GB RAM bildet die zentrale Plattform für die Zusammenführung, Speicherung und Visualisierung der Messdaten. Während der Arduino die Sensoren abfragt und die Lüfter lokal regelt, übernimmt der Raspberry Pi die übergeordneten Serveraufgaben. Diese Aufgabenteilung trennt die eigentliche Regelung von der Datenverarbeitung und ermöglicht es, beide Bereiche unabhängig voneinander zu warten und weiterzuentwickeln. Der Arduino sendet alle zehn Sekunden eine JSON-Zeile mit den

Messwerten über USB-Seriell mit 115200Baud. Die Bridge liest und verarbeitet diese Zeile, schreibt Messfelder in InfluxDB und publiziert Messdaten beziehungsweise Status über MQTT. MQTT-Befehle aus Node-RED werden von der Bridge an den Arduino weitergeleitet. Filter-Schaltbefehle werden nicht als retained gespeichert, der Arduino meldet den bestätigten Schaltzustand zurück.Anhang J Datenfluss Diagramm

Wahl des Betriebssystems

Als Betriebssystem wird Raspberry Pi OS Lite in der 64-bit-Ausführung eingesetzt. Die Lite-Version verzichtet auf eine grafische Desktop-Oberfläche und ist damit für einen Server geeignet, der ohne angeschlossenen Bildschirm betrieben wird. Die Administration erfolgt über die Kommandozeile beziehungsweise über SSH. Für die Bedienung des Systems stehen die browserbasierten Oberflächen von Grafana und Node-RED zur Verfügung; ein zusätzlicher Desktop auf dem Raspberry Pi ist deshalb nicht erforderlich.(Ltd, o. J.)

Durch den Verzicht auf die Desktop-Umgebung werden weniger Arbeitsspeicher und Speicherplatz benötigt. Zudem entfallen zusätzliche grafische Hintergrundprozesse. Dies ist bei den verfügbaren 2 GB RAM relevant, da die Ressourcen vorrangig für Datenbank, Visualisierung und Kommunikationsdienste zur Verfügung stehen sollen. Die 64-bit-Ausführung bietet die Grundlage für den Einsatz entsprechender ARM64-Anwendungen und Container-Images. Sie ist damit eine passende Basis für den vorgesehenen Serverbetrieb, ohne dass daraus allein eine höhere Leistung sämtlicher Anwendungen abgeleitet werden kann.

Containerbasierte Dienste

Die zentralen Serveranwendungen InfluxDB, Grafana, Mosquitto und Node-RED werden in Docker-Containern betrieben. Jeder Dienst läuft dabei mit seiner eigenen Anwendungsumgebung und den benötigten Abhängigkeiten. Dadurch werden Konflikte zwischen unterschiedlichen Bibliotheken oder Softwareversionen reduziert.(*Docker Compose*, 100 n. Chr.)

Im Gegensatz zu vollständigen virtuellen Maschinen verwenden Container gemeinsam den Kernel des Host-Betriebssystems. Es muss somit nicht für jeden Dienst ein eigenes Betriebssystem gestartet werden. Dieser schlanke Ansatz eignet sich für den Raspberry Pi mit seinen begrenzten Ressourcen. Die Container teilen sich jedoch weiterhin dessen CPU, Arbeitsspeicher und Datenträger. Eine garantierte Ressourcentrennung besteht nur, soweit entsprechende Begrenzungen eingerichtet wurden.

Dienst	Port	Aufgabe im Gesamtsystem
InfluxDB 2.7	8086/TCP	Speicherung und Abfrage der Zeitreihendaten mit Zeitstempel und Raumzuordnung; Zugriff über HTTP-API und Weboberfläche.
Grafana	3000/TCP	Browserbasierte Visualisierung der gespeicherten Messwerte und Zustände.
Mosquitto 2	1883/TCP	MQTT-Broker für Bedienbefehle, Telemetrie und Statusmeldungen zwischen Node-RED und Serial-Bridge. Auf dem Host ist der Port nur über 127.0.0.1 erreichbar, Node-RED verbindet sich über das interne Docker-Netz.
Node-RED 4.1	1880/TCP	Browserbasierter Flow-Editor und Bedienoberfläche für die Filterüberwachung. Die Lüfterregelung bleibt auf dem Arduino.

Tabelle 14 / Dienst im System

Die Containerkonfiguration wird über Docker Compose beschrieben. Darin sind beispielsweise Images, Netzwerkverbindungen, Portfreigaben und Datenvolumes festgelegt. Dies macht den Aufbau nachvollziehbarer und erleichtert es, die Dienste auf einem neu eingerichteten System erneut bereitzustellen. Voraussetzung dafür sind weiterhin die passenden Konfigurationsdateien, Zugangsdaten und gesicherten Anwendungsdaten.

Die Containerisierung bietet für das Projekt insbesondere folgende Vorteile:

- Modularität: Die Dienste haben klar abgegrenzte Aufgaben. Einzelne Komponenten können angepasst werden, ohne sämtliche Anwendungen neu installieren zu müssen.
- Wartbarkeit: Container lassen sich einzeln starten, stoppen und ersetzen. Ihre Protokolle können getrennt zur Fehlersuche ausgewertet werden.
- Nachvollziehbare Bereitstellung: Die Compose-Konfiguration dokumentiert die technische Zusammensetzung der Serverumgebung.
- Dauerhafte Datenhaltung: Über eingebundene Volumes können Anwendungsdaten unabhängig vom Lebenszyklus eines Containers erhalten bleiben. Volumes ersetzen allerdings kein Backup.
- Definierte Kommunikation: Die Dienste kommunizieren über ein gemeinsames Docker-Netzwerk. Nur die benötigten Schnittstellen werden nach aussen freigegeben.
- Wiederanlauf: Konfigurierte Neustartregeln unterstützen den erneuten Start von Diensten nach einem Prozessabbruch oder Neustart des Raspberry Pi.

Die Python-Serial-Bridge ist eine bewusste Ausnahme: Sie läuft nicht in einem Container, sondern als systemd-Dienst in einer Python-Umgebung direkt auf dem Raspberry Pi. Dadurch kann sie den USB-Seriell-Port des Arduino unmittelbar verwenden und über die Dienstverwaltung gestartet, überwacht und bei einem Abbruch neu gestartet werden. Die Anwendungsebene ist somit überwiegend, aber nicht vollständig containerisiert.

Kommunikation und Datenpfad

Der Arduino sendet alle zehn Sekunden eine JSON-Zeile mit den Messwerten über USB-Seriell mit 115200 Baud. JSON stellt ein gemeinsames, sprachunabhängiges Austauschformat zwischen der C++-Firmware und der Python-Bridge bereit. Jede Nachricht wird mit einem Zeilenumbruch abgeschlossen, sodass die Bridge die Datensätze voneinander trennen kann.

Die Bridge liest und verarbeitet die Nachrichten, ordnet die Messwerte den Räumen zu und schreibt sie in InfluxDB. Zusätzlich veröffentlicht sie Telemetrie und Statusmeldungen über Mosquitto für die Verarbeitung in Node-RED. Grafana fragt die gespeicherten Zeitreihen direkt aus InfluxDB ab. Der Datenpfad zur Datenbank ist somit nicht von MQTT abhängig.

In der Gegenrichtung übermittelt Node-RED Bedienbefehle über MQTT an die Bridge. Diese übersetzt sie in serielle Befehle für den Arduino. Filter-Schaltbefehle werden bewusst nicht als retained gespeichert, damit ein früherer Befehl nach einer erneuten Verbindung nicht allein aufgrund seiner Speicherung nochmals zugestellt wird. Der Arduino meldet den bestätigten Schaltzustand zurück; die Bedienoberfläche zeigt damit den tatsächlich bestätigten Zustand und nicht nur die angeforderte Änderung an.

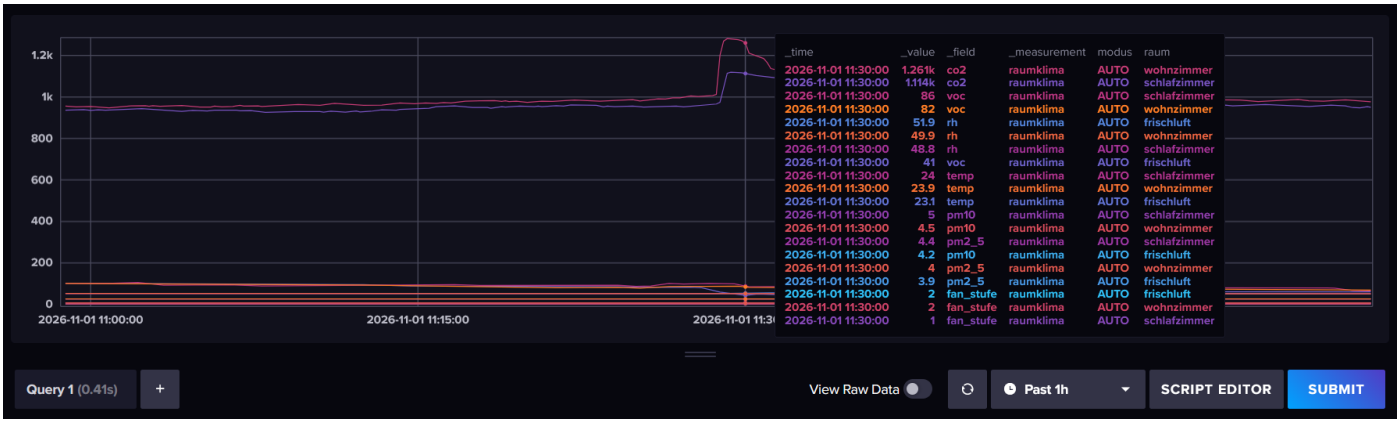


Abbildung 37 / InfluxDB Visualisierung/ Eingang der Messwerte

Besonderheit und Nutzen des Aufbaus

Die Besonderheit dieses Aufbaus liegt nicht in einer einzelnen Softwarekomponente, sondern in deren klarer Zusammenarbeit: Der Arduino übernimmt die lokale Regelung, der Raspberry Pi die Serverfunktionen und die Container strukturieren die einzelnen Anwendungen. Messwerterfassung, Regelung, Speicherung, Visualisierung und Bedienung bleiben dadurch funktional voneinander getrennt.

Ein Ausfall von Grafana verhindert beispielsweise die Anzeige, führt aber nicht unmittelbar zum Stillstand der Arduino-Regelung. Ebenso kann die Bedienoberfläche verändert werden, ohne die gesamte Regelungsfirmware neu zu entwickeln. Diese Struktur erleichtert die Fehlersuche und schafft eine Grundlage für spätere Erweiterungen, etwa zusätzliche Sensoren oder weitere Auswertungen.

Die Trennung ist jedoch keine vollständige Ausfallsicherheit: Alle Serverdienste nutzen denselben Raspberry Pi und dessen Speicher. Zudem wird der Arduino über den USB-Anschluss des Pi versorgt. Bei einem Verlust dieser Stromversorgung ist deshalb auch der Weiterbetrieb der lokalen Regelung nicht gewährleistet.

Datensicherung und Backup-Ablauf

Zum Schutz der in InfluxDB gespeicherten Messdaten wurde eine zweistufige Sicherung eingerichtet. Zunächst erstellt der Raspberry Pi täglich um 03:15 Uhr ein Backup des InfluxDB-Buckets raumklima. Dabei wird ein Archiv erzeugt; auf dem Pi bleiben die 14 neuesten Archive erhalten.

Da der Laptop nicht ständig eingeschaltet ist, holt er die Sicherungen unabhängig vom Erstellungszeitpunkt zweimal täglich – um 12:00 und 18:00 Uhr – per SSH und SCP vom Raspberry Pi ab. Auf dem Laptop werden die 30 neuesten Kopien aufbewahrt. Dieses Abrufverfahren stellt sicher, dass ein verpasstes Zeitfenster nicht verhindert, dass das zuletzt verfügbare Backup übertragen wird.

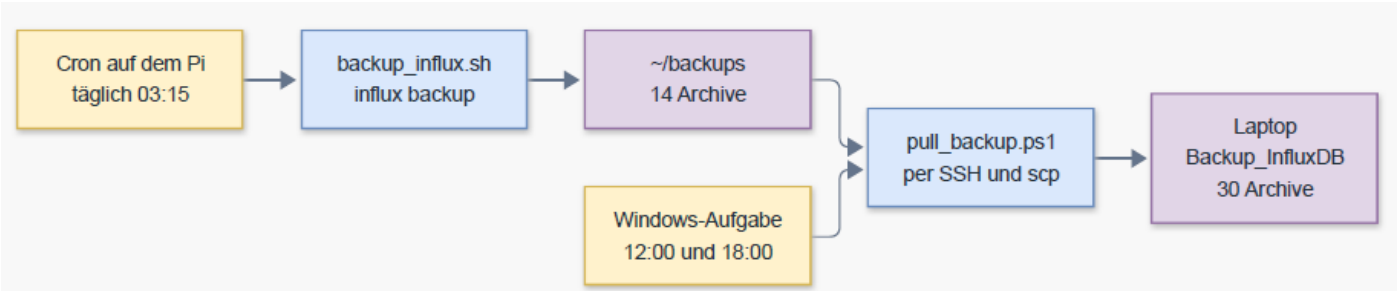


Abbildung 38 / Ablaufdiagramm Backup

2.2.5 Bedienung und Visualisierung

Für die Darstellung der Messwerte und die Bedienung des Systems werden zwei browserbasierte Oberflächen eingesetzt: Grafana dient der Visualisierung und Analyse der gespeicherten Messdaten. Die Bedienoberfläche für die Filterüberwachung wird mit FlowFuse Dashboard 2, einer Erweiterung für Node-RED, erstellt. Während das Dashboard die Schalter und Statusanzeigen bereitstellt, übernimmt Node-RED die Verarbeitung und Weiterleitung der zugehörigen MQTT-Nachrichten.

Da beide Oberflächen über einen Webbrowser erreichbar sind, ist keine zusätzliche Bedienungssoftware auf dem verwendeten Laptop oder Tablet erforderlich. Der Zugriff erfolgt über das lokale Netzwerk beziehungsweise eine direkte Ethernet-Verbindung zum Raspberry Pi.

Grafana, Visualisierung der Messwerte

Grafana greift auf die in InfluxDB gespeicherten Zeitreihen zu und stellt diese in thematisch gegliederten Panels dar. Dadurch lassen sich sowohl aktuelle Messwerte als auch Veränderungen über einen ausgewählten Zeitraum betrachten. Die gemeinsame Darstellung der Raumwerte erleichtert den Vergleich zwischen Wohnzimmer, Schlafzimmer und Frischluftkanal. Beispielsweise können unterschiedliche CO_2-Verläufe oder Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit nachvollzogen werden.

Panel	**Dargestellte Werte**	**Zweck**
CO_2	CO_2-Konzentration in Wohnzimmer und Schlafzimmer in ppm	Beobachtung und Vergleich der CO_2-Verläufe beider Räume
Temperatur	Wohnzimmer, Schlafzimmer und Frischluft in °C	Darstellung der Temperaturentwicklung und Vergleich von Raum- und Zulufttemperatur
Relative Luftfeuchtigkeit	Wohnzimmer, Schlafzimmer und Frischluft in %	Beobachtung der Feuchteentwicklung im Zusammenhang mit den festgelegten Prototypschwellen
VOC-Index	VOC-Index an den drei Messstellen, ohne Einheit	Darstellung relativer Veränderungen gegenüber der vom Sensor erlernten Hintergrundbelastung
Feinstaub	Drei Panels mit jeweils PM1, PM2.5, PM4 und PM10 in µg/m³	Vergleich der Partikelmassenkonzentrationen und ihrer zeitlichen Entwicklung
Filterüberwachung	Druck vor und nach dem Filter, berechneter Differenzdruck und farblicher Status	Nachvollziehbare Darstellung der druckbasierten Filterbewertung
Zuluftqualität	Feinstaub und VOC-Index nach dem Filter, VOC auf einer zweiten Achse	Separate Beobachtung der Luftqualität hinter dem Filter

Tabelle 15 / Übersicht Grafan Panels

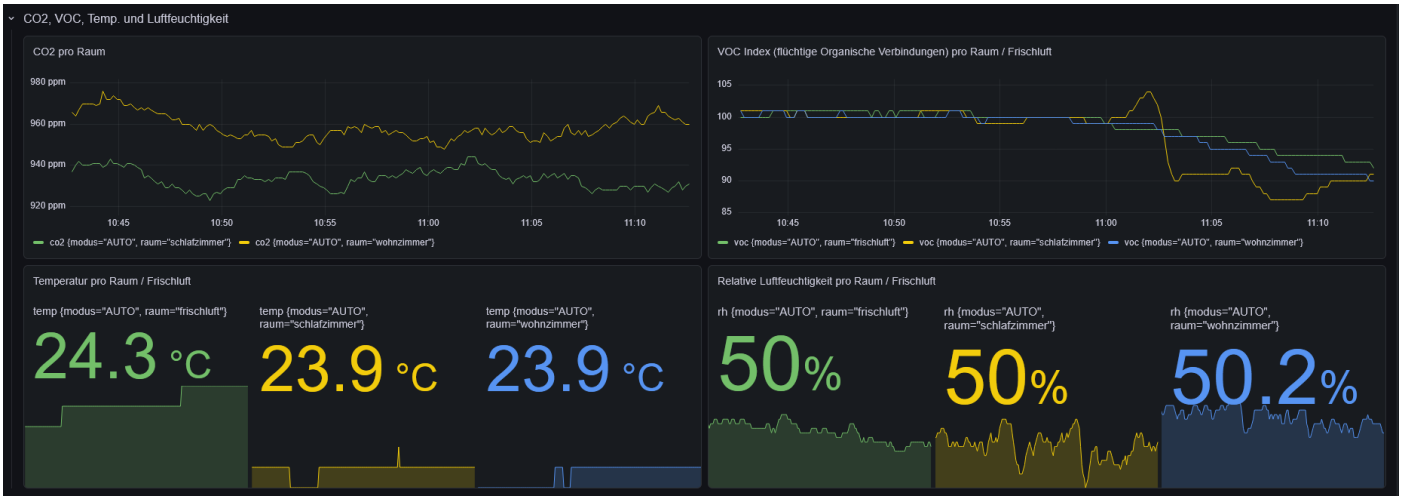


Abbildung 39 / Dashboard Panels CO2, VOC, Temp. und Luftfeuchtigkeit pro Raum



Abbildung 40 / Dashboard Panels Feinstaub pro Raum

Bei der Filterüberwachung werden die beiden Druckmesswerte gemeinsam mit ihrer berechneten Differenz dargestellt. Dadurch lässt sich nachvollziehen, auf welchen Messwerten die Statusbewertung beruht. Die numerischen Statuswerte werden in verständliche Texte und Farben übersetzt, beispielsweise „Filter in Ordnung“, „Filter bald ersetzen“ oder „Filter verstopft“. Diese Bezeichnungen beschreiben die Bewertung anhand der hinterlegten Prototypschwellen, nicht einen unabhängig bestätigten tatsächlichen Verschmutzungszustand des Filters.

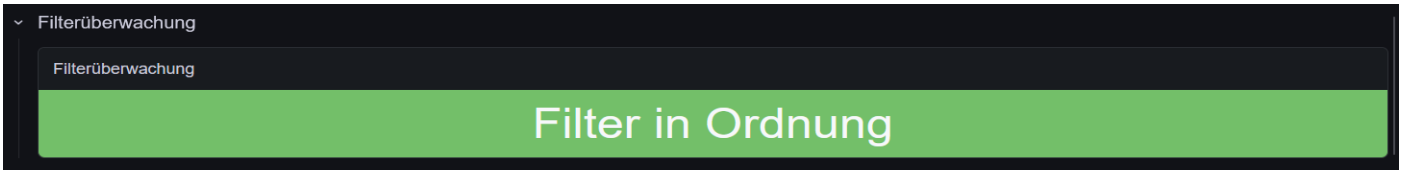


Abbildung 41 / Dashboard Panel Filterüberwachung, Meldung "Filter in Ordnung"

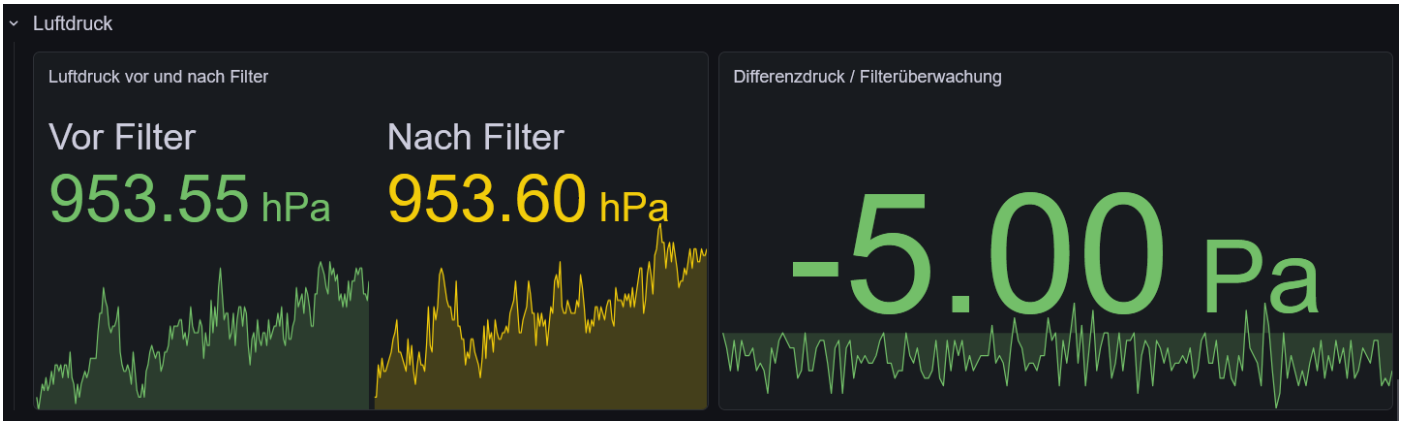


Abbildung 42 / Dashboard Panel Luftdruck und Differenzdruck

Davon getrennt wird die Zuluftqualität nach dem Filter dargestellt. PM- und VOC-Werte beschreiben die dort gemessene Luftbelastung. Sie sind allein weder ein Nachweis einer Filterverstopfung noch einer bestimmten Filterabscheidung. Für die Bestimmung einer Partikelabscheidung wären vergleichbare Messungen vor und nach dem Filter erforderlich. Der VOC-Index ist zudem ein relativer, lernender Index und keine absolute Schadstoffkonzentration.



Abbildung 43 / Dashboard Panel Zuluftqualität, "Zuluftqualität gut"

Node-RED und FlowFuse Dashboard 2 – Bedienoberfläche

Node-RED stellt zusammen mit der Erweiterung FlowFuse Dashboard 2 eine kompakte, browserbasierte Bedienoberfläche für die Filterüberwachung bereit. Während Node-RED die Nachrichtenverarbeitung und Kommunikationsabläufe übernimmt, stellt FlowFuse Dashboard 2 die sichtbaren Bedienelemente und Anzeigen zur Verfügung. Dazu gehört der Schalter zum Ein- und Ausschalten der Überwachung sowie Anzeigen für Verbindung, Differenzdruck, Filterstatus und Fehlermeldungen. Eine separate FlowFuse-Verwaltungsplattform wird nicht eingesetzt.Anhang I Diagramm Node-RED Bedienoberfläche

Bedienelement / Anzeige	**Funktion**
Schalter „Filteralarme überwachen“	Aktiviert oder deaktiviert die druckbasierte Filterüberwachung
Bestätigter Schaltzustand	Zeigt den vom Arduino zurückgemeldeten Zustand der Überwachung

Filterstatus	Stellt die aktuelle Bewertung anhand der Prototypschwellen als Text und Farbe dar
Differenzdruck	Zeigt die berechnete Druckdifferenz zwischen den beiden BME280
Verbindungsstatus	Zeigt den gemeldeten Online-/Offline-Zustand der Bridge auf dem Raspberry Pi
Fehlermeldung	Macht gemeldete Kommunikations- oder Steuerungsfehler sichtbar

Tabelle 16 / Node-RED Bedienoberfläche

Eine Schalterbetätigung wird nicht lediglich als lokale Änderung der Oberfläche behandelt. Das Bedienelement im FlowFuse Dashboard 2 übergibt den gewünschten Zustand an den zugehörigen Node-RED-Flow. Dieser veröffentlicht den Befehl über MQTT. Die Serial-Bridge empfängt ihn und leitet ihn über USB-Seriell an den Arduino weiter. Der Arduino verarbeitet den Befehl und sendet den bestätigten Zustand zurück. Über die Bridge und MQTT gelangt diese Bestätigung wieder zu Node-RED und wird im Dashboard angezeigt.

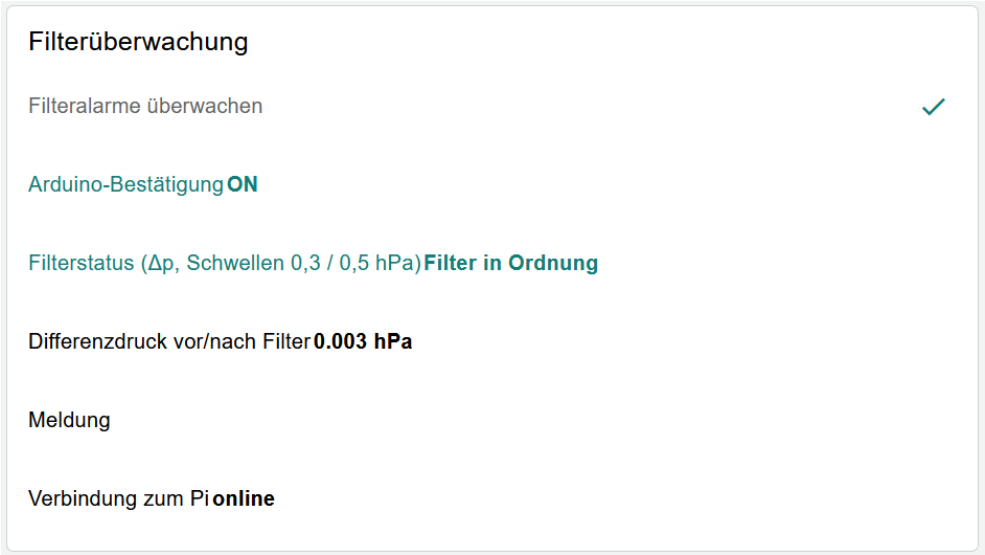


Abbildung 44 / Node-Red Bedienoberfläche Filterüberwachung

2.2.6 Testverfahren und Kalibrierung

Die Umsetzung erfolgte schrittweise. Zuerst wurden Sensoren, I²C-Adressen und Aktoren einzeln in einem Hardwaretest geprüft. Danach wurden Datenerfassung und serielle Kommunikation eingerichtet, bevor Datenbank, MQTT, Bedienoberfläche und Visualisierung integriert wurden. Die Regelungslogik wurde anschliessend als eigener Automatik-Sketch ergänzt. Bedien- und Architekturvarianten wurden angepasst, wenn sie im Modell keinen Nutzen brachten. Alle Grundfunktionale Tests sind erfüllt. Die einzelnen Schwellen der Regelungslogik sind in den Ergebnissen mit Screenshots festgehalten.

Schritt	Ziel und Vorgehen	Stand
Hardware-Grundtest	I²C-Geräte erkennen, BME280-Adressen, LEDs und Lüfterkanäle einzeln prüfen	Hardwaretest durchgeführt, BME280 auf 0x76/0x77erkannt

Datenübertragung	Zeilenorientierte JSON-Telemetrie über USB-Seriell an Pi-Bridge senden	Daten kommen in InfluxDB an
Visualisierung und Bedienung	Grafana-Panels aufbauen, Node-RED-Schalter über MQTT anbinden	Dashboards und Filterbedienung sind erstellt, Daten könne visualisiert werden
Regelung	Schwellen und drei Stufen auf dem Arduino implementieren	Automatik-Sketch ist auf dem Arduino, Schwellen sind Prototypwerte
Filter und Nachtkühlung	Filterstatus beziehungsweise Nachtkühlung unter definierten Bedingungen prüfen	Filter-Schwellen sind getestet, Nachtkühlungstest ist noch offen
BME280-Offset	Beide Sensorwerte vergleichen, Korrektur mit der Referenz implementieren	Bisheriger Einpunkt-Abgleich auf 950,0hPa ist dokumentiert
CO_2-Regelung	SCD-41 anhauchen	Getestet, Reaktion ist in den Ergebnissen dokumentiert
Feuchteregelung	rF unter 45 % bzw. über 50 % bringen, SEN54 anhauchen, Fenster öffnen	Getestet, Reaktion ist in den Ergebnissen dokumentiert
Lüfterstufen	PWM 240 / 247 / 255 je Lüfter	Drehzahl akustisch getestet

Tabelle 17 / Testverfahren

2.3 Ergebnisse

2.3.1 Prototyp und Sensor-Datenfluss

Der Prototyp besteht aus den Sensoren in zwei Modellräumen und im zentralen Frischluftkanal, dem Arduino als lokaler Steuerung sowie einem Raspberry Pi für Speicherung, Visualisierung und Bedienung. Die Verbindung vom Arduino zum Raspberry Pi erfolgt über USB-Seriell. Die Messdaten werden alle zehn Sekunden übertragen und in InfluxDB gespeichert.

Standort	**Erfasste Grössen**	**Sensor / I²C-Kanal**	**Übertragung**
Wohnzimmer	CO_2; Temperatur; relative Feuchte; PM1, PM2.5, PM4, PM10; VOC-Index	SCD-41 auf TCA-Kanal 0. SEN54 auf Kanal 2	JSON-Felder unter wohnzimmer
Schlafzimmer	CO_2; Temperatur; relative Feuchte; PM1, PM2.5, PM4, PM10; VOC-Index	SCD-41 auf TCA-Kanal 1, SEN54 auf Kanal 3	JSON-Felder unter schlafzimmer
Frischluftkanal	Temperatur; relative Feuchte; PM1, PM2.5, PM4, PM10; VOC-Index; Druck vor/nach Filter; Differenzdruck und Filterstatus	SEN54 auf TCA-Kanal 4, BME280 direkt am Hauptbus auf 0x76/0x77	JSON-Felder unter frischluft

Tabelle 18 / Datenfluss

Der Arduino überträgt die Messwerte als JSON-Nachricht. Diese enthält die drei Objekte „wohnzimmer“, „schlafzimmer“ und „frischluft“. Innerhalb dieser Objekte werden die einzelnen Messgrössen durch eindeutige Feldnamen bezeichnet. Die folgende Tabelle zeigt die wichtigsten Felder und deren Bedeutung.

JSON-Feld	Bedeutung	Einheit
co2	CO_2-Konzentration, nur in den beiden Räumen	ppm
temp	Temperatur des SEN54	°C
rh	Relative Luftfeuchtigkeit	%
pm1, pm2_5, pm4, pm10	Partikelmassenkonzentrationen	µg/m³
voc	VOC-Index	Ohne Einheit
fan_stufe	Ausgegebene Lüfterstufe 0–3	Ohne Einheit
druck_vor_filter, druck_nach_filter	Korrigierte BME280-Druckwerte	hPa
filter_dp_hpa	Berechneter Differenzdruck	hPa
filter_status	Filterstatus als Zahl 0–4	Ohne Einheit

Tabelle 19 / JSON-Nachricht

Ergebnisse, Screenshots einer JSON-Nachricht im Terminal für „wohnzimmer“, „schlafzimmer“ und „frischluft“.

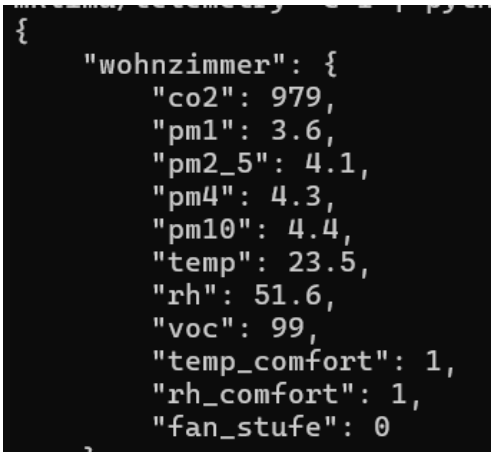


Abbildung 46 / JSON Nachricht "wohnzimmer"

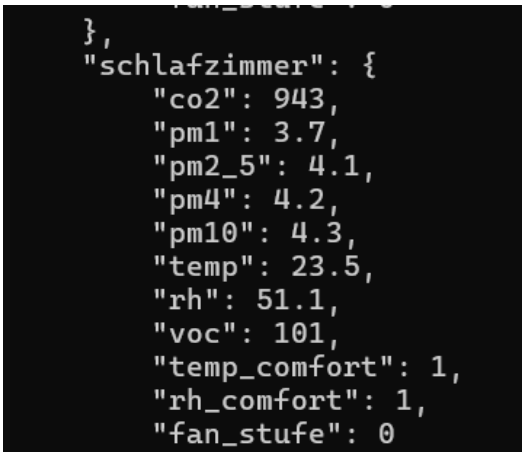


Abbildung 45 / JSON Nachricht "schlafzimmer"

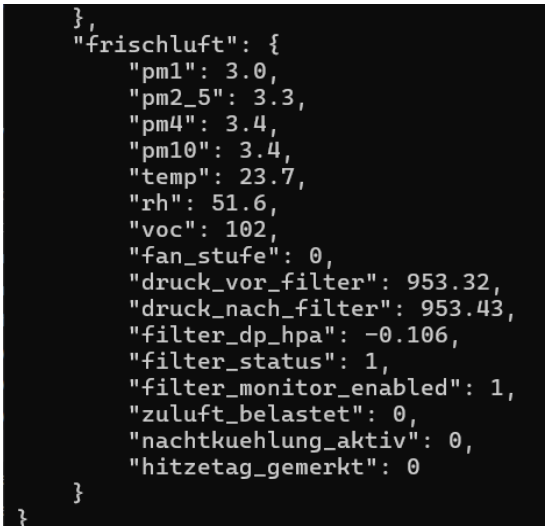


Abbildung 47 / JSON Nachricht "frischluft"

Nachweis der Messdatenspeicherung in InfluxDB

InfluxDB dient als zentrale Zeitreihendatenbank des Systems. Die Serial-Bridge auf dem Raspberry Pi empfängt die JSON-Nachrichten des Arduino, verarbeitet die enthaltenen Messwerte und schreibt diese in den Bucket „raumklima“. Die Daten werden unter dem Measurement „raumklima“ abgelegt und über das Tag raum dem jeweiligen Messort zugeordnet.

Zur Überprüfung der Speicherung können die Daten im Data Explorer mit einer Flux-Abfrage ausgelesen werden. Die dargestellte Abfrage beschränkt sich auf die CO_2-Messwerte des Wohnzimmers innerhalb eines ausgewählten Zeitraums. In der Tabellenansicht sind der Zeitstempel (_time), der Messort (raum), das Messfeld (_field) und der gespeicherte Wert (_value) sichtbar. Für das Feld co2 entspricht der Zahlenwert der CO_2-Konzentration in ppm.



Abbildung 48 / InfluxDB CO_2-Werte des Wohnzimmers aus den letzten 30 Minuten

Die Tabellenansicht ermöglicht eine direkte Kontrolle der gespeicherten Datenpunkte. Anhand aufeinanderfolgender Zeitstempel lässt sich zudem prüfen, ob die Daten im vorgesehenen Abstand von ungefähr zehn Sekunden vorliegen.

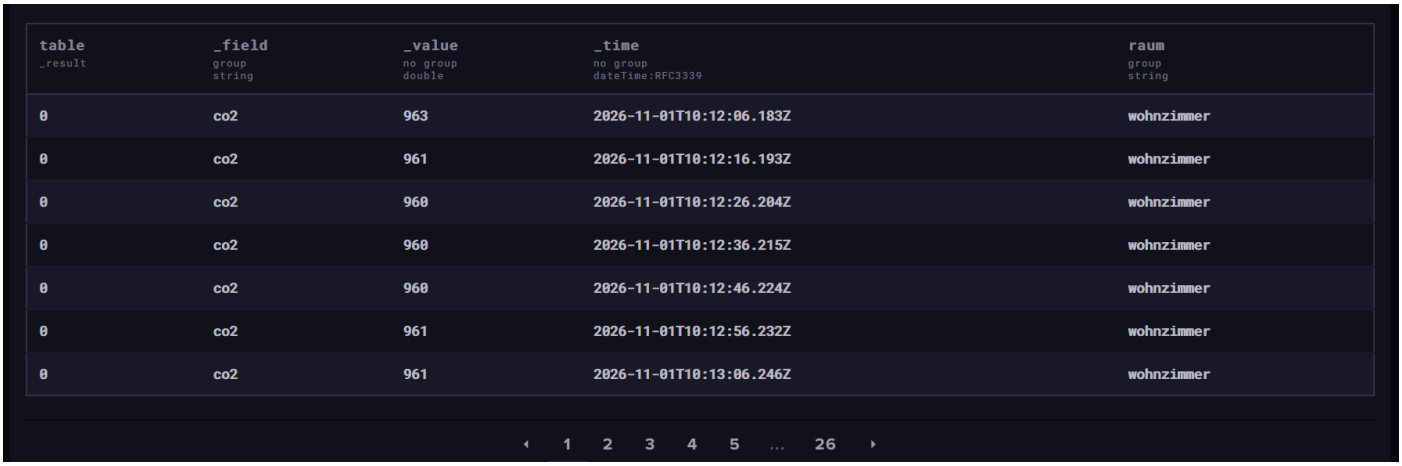


table _result	_field group string	_value no group double	_time no group dateTime:RFC3339	raum group string
0	co2	963	2026-11-01T10:12:06.183Z	wohnzimmer
0	co2	961	2026-11-01T10:12:16.193Z	wohnzimmer
0	co2	960	2026-11-01T10:12:26.204Z	wohnzimmer
0	co2	960	2026-11-01T10:12:36.215Z	wohnzimmer
0	co2	960	2026-11-01T10:12:46.224Z	wohnzimmer
0	co2	961	2026-11-01T10:12:56.232Z	wohnzimmer
0	co2	961	2026-11-01T10:13:06.246Z	wohnzimmer

‹ 1 2 3 4 5 … 26 ›

Abbildung 49 / InfluxDB Tabellenansicht mit 10s Zeitstempel

Der Screenshot der Abfrage dokumentiert die Speicherung und Abfragbarkeit der dargestellten Messwerte in InfluxDB. Zusammen mit der empfangenen JSON-Nachricht und der anschliessenden Darstellung desselben Zeitraums in Grafana wird der Datenpfad vom Arduino über den Raspberry Pi bis zur Visualisierung nachvollziehbar.

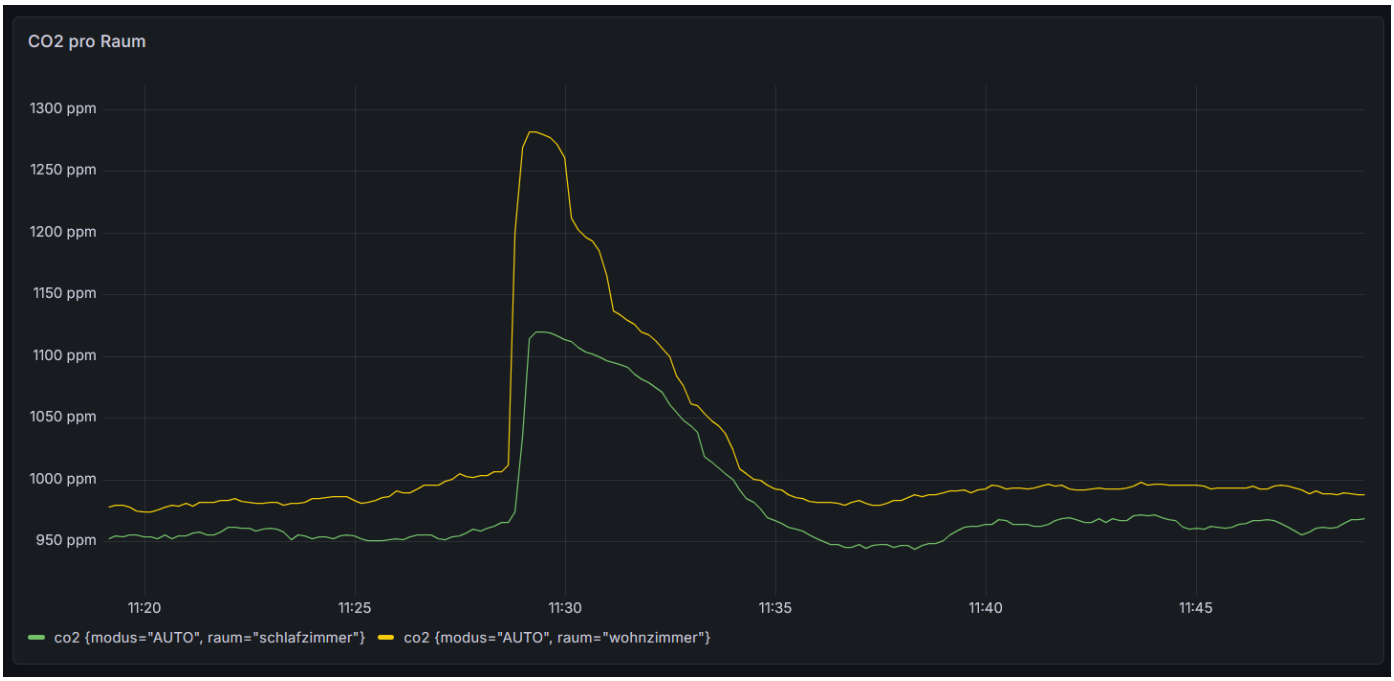


Abbildung 50 / CO2 Messwerte der letzten 30min in Grafana

2.3.2 Regelungslogik der Räume

Die Regelungslogik wurde anhand praktischer Funktionstests am Prototyp überprüft. Dabei wurden die Messgrössen gezielt verändert und die Reaktionen der Sensoren sowie der zugehörigen Lüfter beobachtet. Die Messwertverläufe wurden mit Screenshots aus Grafana festgehalten.

Die Testeinflüsse wurden überwiegend auf einen einzelnen Modellraum beschränkt. Dadurch konnte die raumbezogene Verarbeitung der Messwerte veranschaulicht werden: Die beiden Raumlüfter werden anhand der jeweils zugeordneten Sensorwerte angesteuert. Der Zentrallüfter berücksichtigt zusätzlich den höchsten Luftqualitätsbedarf der Räume.

Messgrösse	**Durchgeführter Funktionstest**	**Beobachtung**
CO_2	Anhauchen des SCD-41 im ausgewählten Modellraum	Die CO_2-Konzentration stieg deutlich an. Der zugehörige Lüfter reagierte auf die veränderten Messwerte und schaltete entsprechend der Regelungslogik.
Relative Luftfeuchtigkeit	Anhauchen des SEN54 beziehungsweise Öffnen der Fenster zur Zufuhr trockenerer Luft	Die Feuchtewerte veränderten sich. Die Lüfter reagierten auf die veränderten Bedingungen.

VOC-Index	Testeinfluss durch Nagellackentferner	Der VOC-Index stieg an. Die Reaktion ist anhand der Grafana-Screenshots dokumentiert.
Feinstaub	Testeinfluss durch ein Streichholz sowie Staubentwicklung beim Umgang mit trockenem Stroh und Heu während des misten des Meerschweinchen Bereichs	Die Partikelmesswerte reagierten auf die veränderte Luftbelastung. Die Verläufe sind in Grafana festgehalten.

Tabelle 20 / Funktionstest Regelungslogik

CO2-Test

Durch das Anhauchen des CO2 Sensors beim SCD-41 im Schlafzimmer, stieg der Wert auf über 2‘000ppm. Der Zentrallüfter schaltete dadurch auf die max. Lüfterstufe drei, mit der LED als blau visualisiert. Als sich der Wert wieder unter 1‘000ppm einpendelte schaltet die Lüftung ab auf Stufe null rote LED. Der parallele Anstieg der Luftfeuchtigkeit rh hängte auch mit dem Anhauchen an.



Abbildung 51 / Test anhauchen des SCD-41 im Schlafzimmer, CO2 wert stieg sofort auf 2`590ppm sowie die Luftfeuchtigkeit 56%, Daten InfluxDB

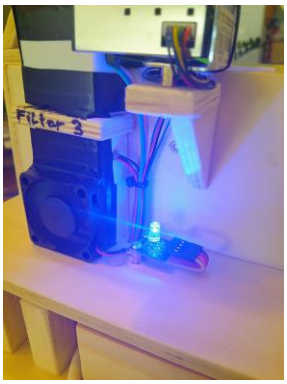


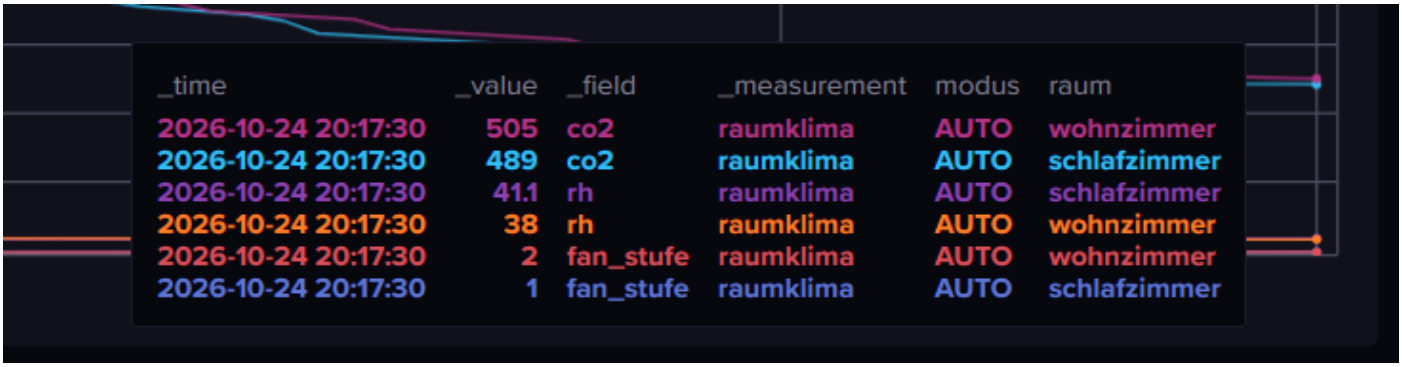
Abbildung 53 / Zentrallüfter Betriebsstufe 3, blaue LED



Abbildung 52 / Zentrallüfter AUS, rote LED

Luftfeuchtigkeitstest

Durch das öffnen der Fenster und Balkontüre sank die Luftfeuchtigkeit rasch ab. Die Steuerungslogik schaltet die beiden Luftbefeuchter / Wäscher für Wohnzimmer auf Stufe zwei und Schlafzimmer Stufe eins. Da die Luftfeuchtigkeit im Wohnzimmer unter 40% betrug schaltet die Logik auf Stufe zwei.



_time	_value	_field	_measurement	modus	raum
2026-10-24 20:17:30	505	co2	raumklima	AUTO	wohnzimmer
2026-10-24 20:17:30	489	co2	raumklima	AUTO	schlafzimmer
2026-10-24 20:17:30	41.1	rh	raumklima	AUTO	schlafzimmer
2026-10-24 20:17:30	38	rh	raumklima	AUTO	wohnzimmer
2026-10-24 20:17:30	2	fan_stufe	raumklima	AUTO	wohnzimmer
2026-10-24 20:17:30	1	fan_stufe	raumklima	AUTO	schlafzimmer

Abbildung 54 / Messdaten und Zeitstempel in InfluxDB, absinken der Luftfeuchtigkeit und das dadurch erhöhen der Lüfterstufen

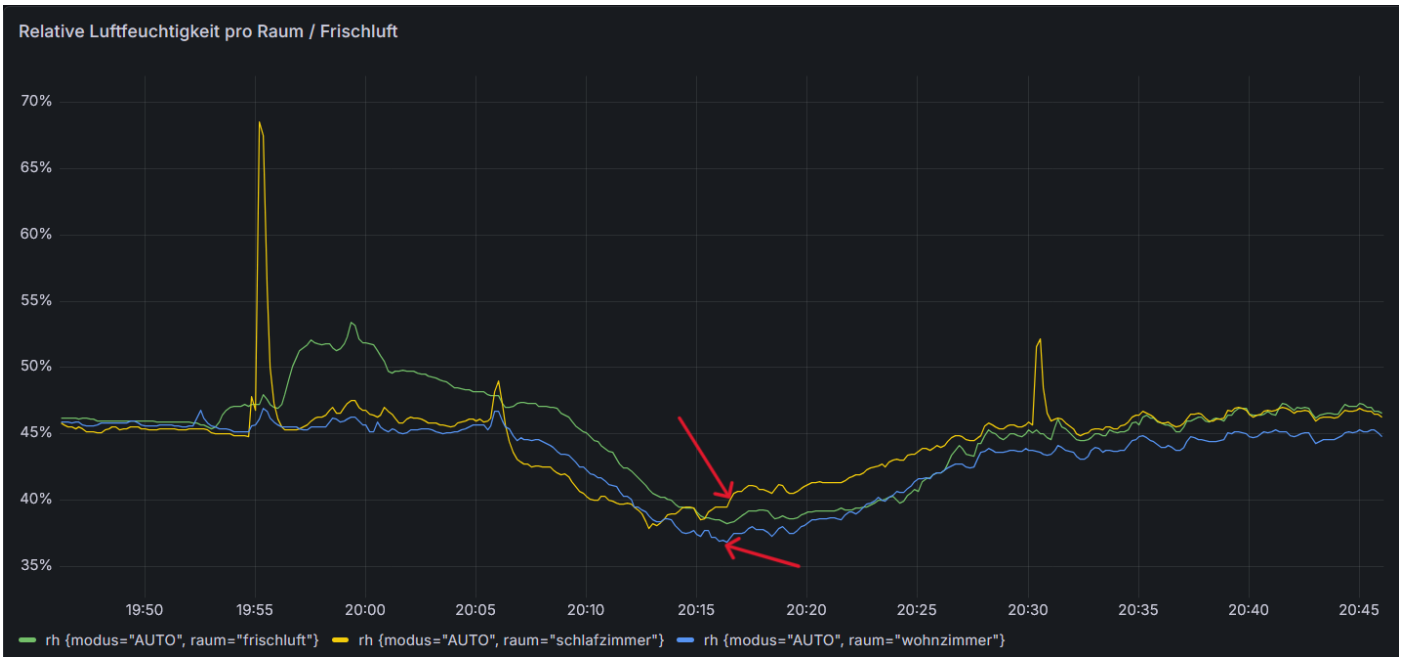


Abbildung 55 / Grafana Visualisierung absinken der Luftfeuchtigkeit unter 40%

VOC-Test

Beim VOC-Test wurde Nagellackentferner verwendet. Die Gase des Nagellackes verursachten eine Reaktion im Wohnzimmer von 375 sowohl auch im Schlafzimmer von 277. Die Luftbefeuchter / Wäscher und Zentrallüfter schalteten entsprechend. Entsprechende Screenshots von InfluxDB und Grafana.

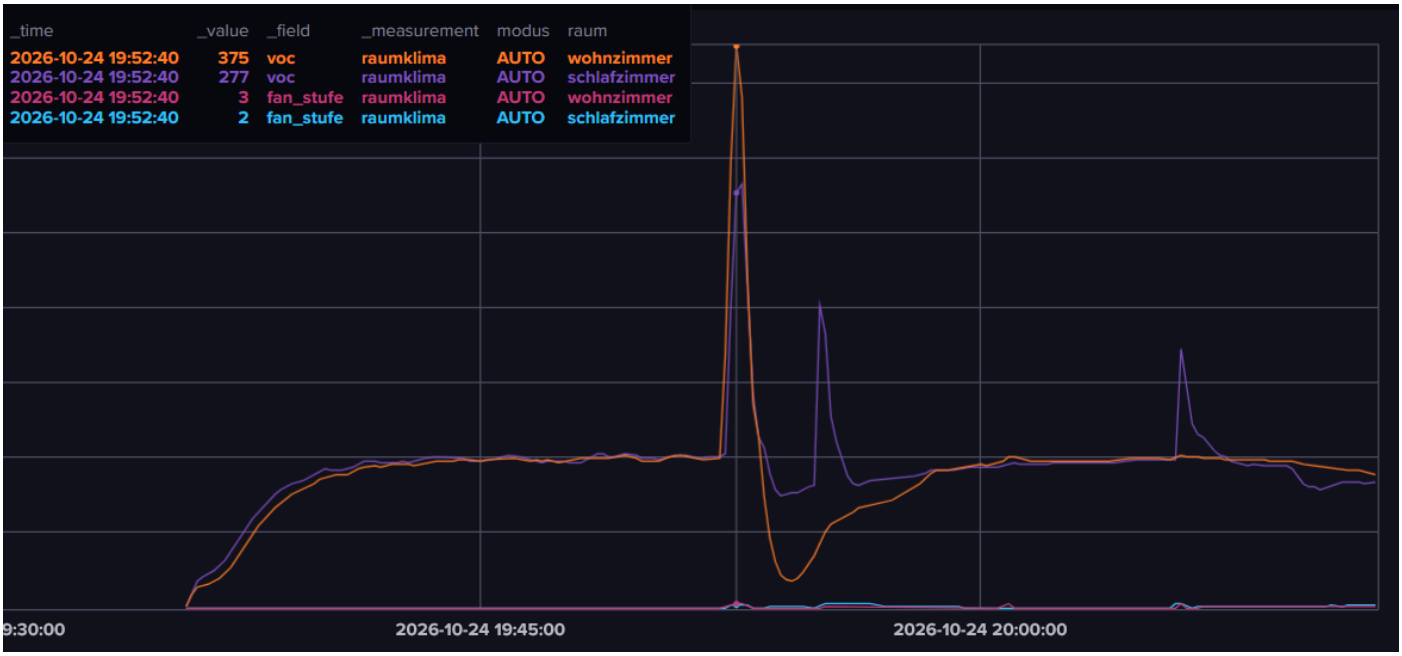


Abbildung 56 / Visualisierung in InfluxDB, VOC-Test mit Nagellackentferner, der VOC wert stieg entsprechend an, auch die Lüfterstufen erhöhten sich auf 3 resp. 2

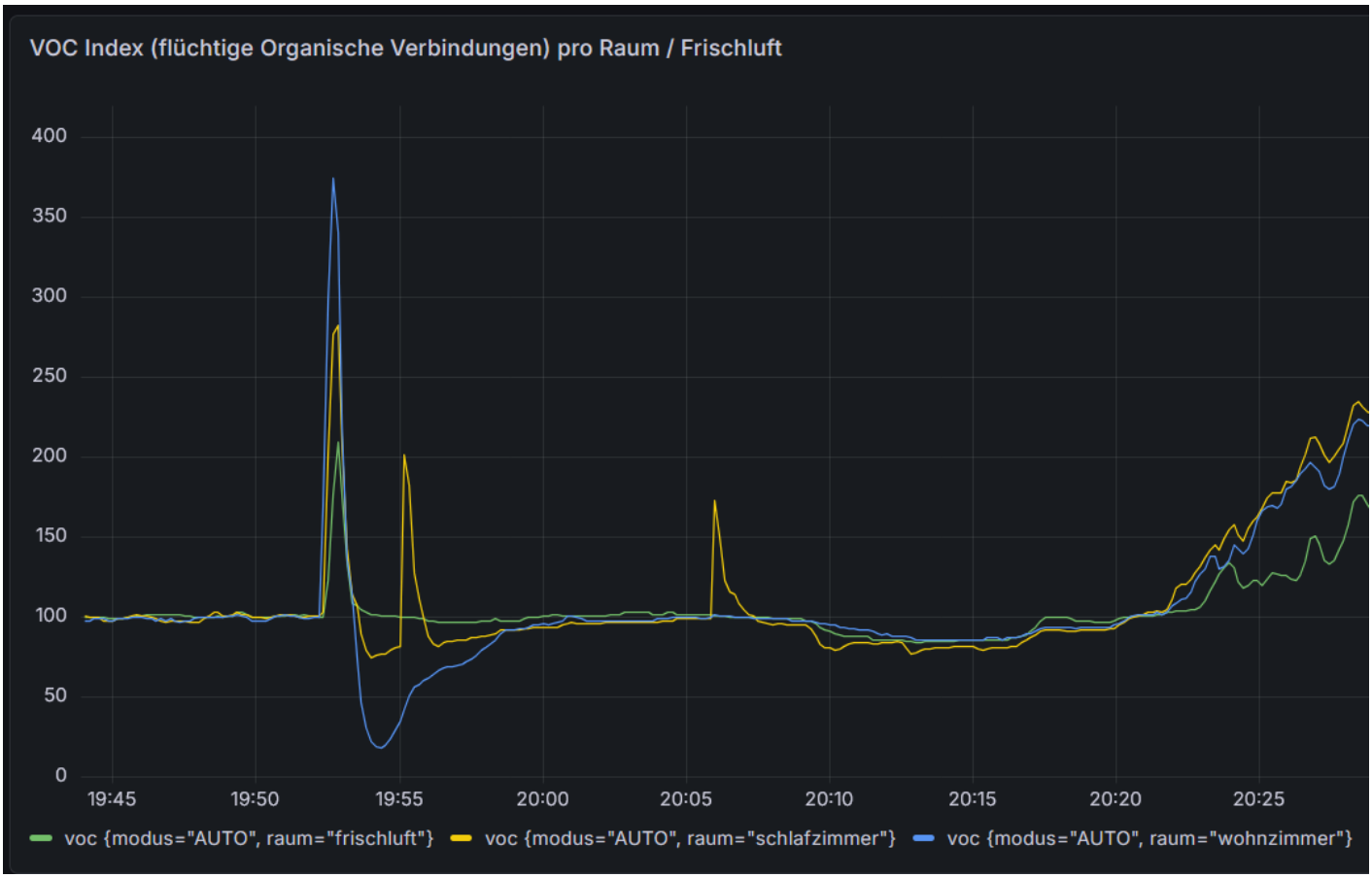


Abbildung 57 / VOC Panel in Grafana, entsprechend analog zu InfluxDB abgebildet

Feinstaub-Test

Bei diesem Test wurde einerseits aufgezeichnet wie die Feinstaubwerte, besonders bei PM10, beim misten des Meerschweinchen Gehege markant anstiegen. Das Mistmaterial, wie Stroh, Heu und Streusubstrat generierte diese Werte. Entsprechende Screenshots von Grafana.

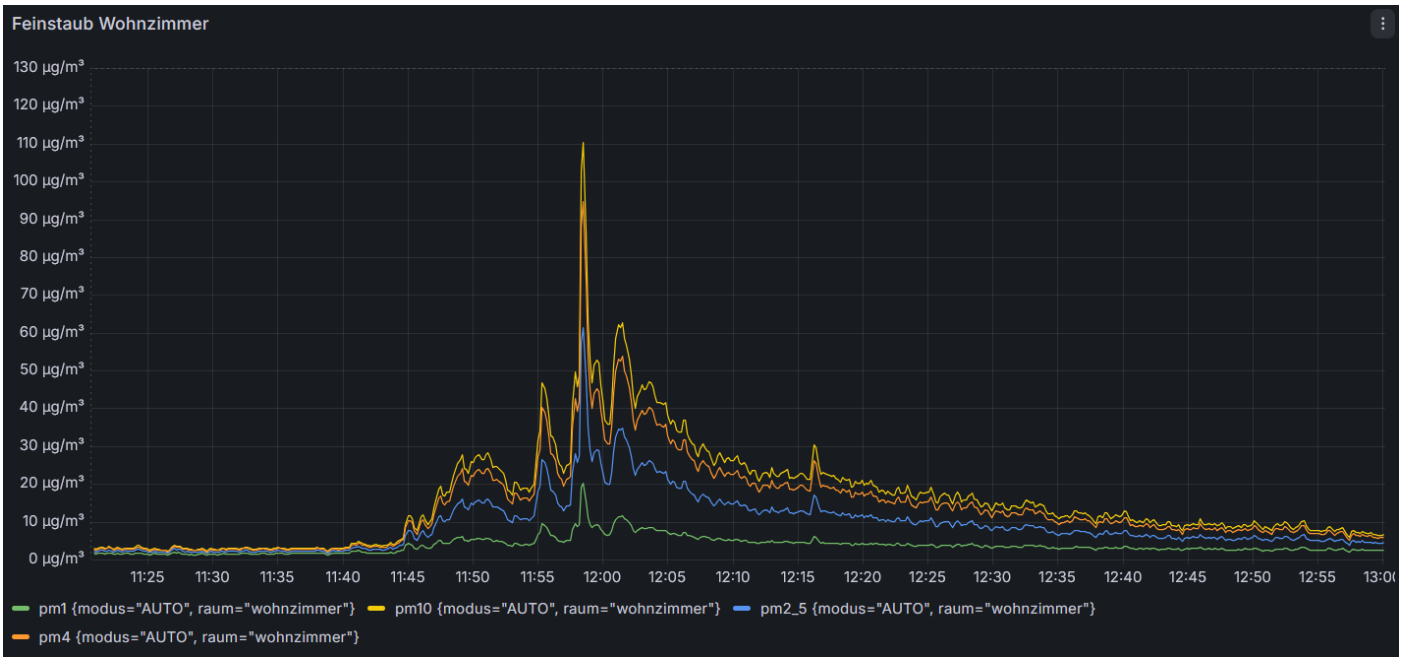


Abbildung 58 / Visualisierung im Panel Feinstaub Wohnzimmer, Reaktion der Feinstaub Messwerte durch das misten der Meerschweinchen Kiste

Bei einem weiteren Test habe ich ein Streichholz vor dem Schlafzimmer angezündet. Der durch den Schwefel entstandener Feinstaub ist auf über PM10 6‘000 µg/m3 angestiegen. Der Zentrallüfter für die Frischluft und der Luftbefeuchter / Wäscher sind sofort auf Stufe drei hochgefahren. Bei Wohnzimmer hingegen blieb die Lüfterstufe bei null, da dort keine Konzentration gemessen wurde. Entsprechende Screenshots von InfluxDB und Grafana.

Die Tests zeigen, dass die Sensoren auf Veränderungen ihrer Umgebung reagieren und die Regelung diese Messwerte zur Lüfteransteuerung verwendet. Insbesondere die Versuche in jeweils einem Modellraum verdeutlichen die getrennte Messwerterfassung und raumbezogene Regelung.

Es handelt sich um qualitative Funktionstests, nicht um eine Kalibrierung mit bekannten Referenzkonzentrationen. Beispielsweise verändert Atemluft neben CO_2 auch Temperatur und Feuchtigkeit; die Testeinflüsse sind daher nicht vollständig voneinander isoliert. Die Versuche belegen die grundsätzliche Funktion des Prototyps, jedoch nicht automatisch die Genauigkeit sämtlicher Messwerte oder das exakte Schaltverhalten an jeder einzelnen Schwelle.

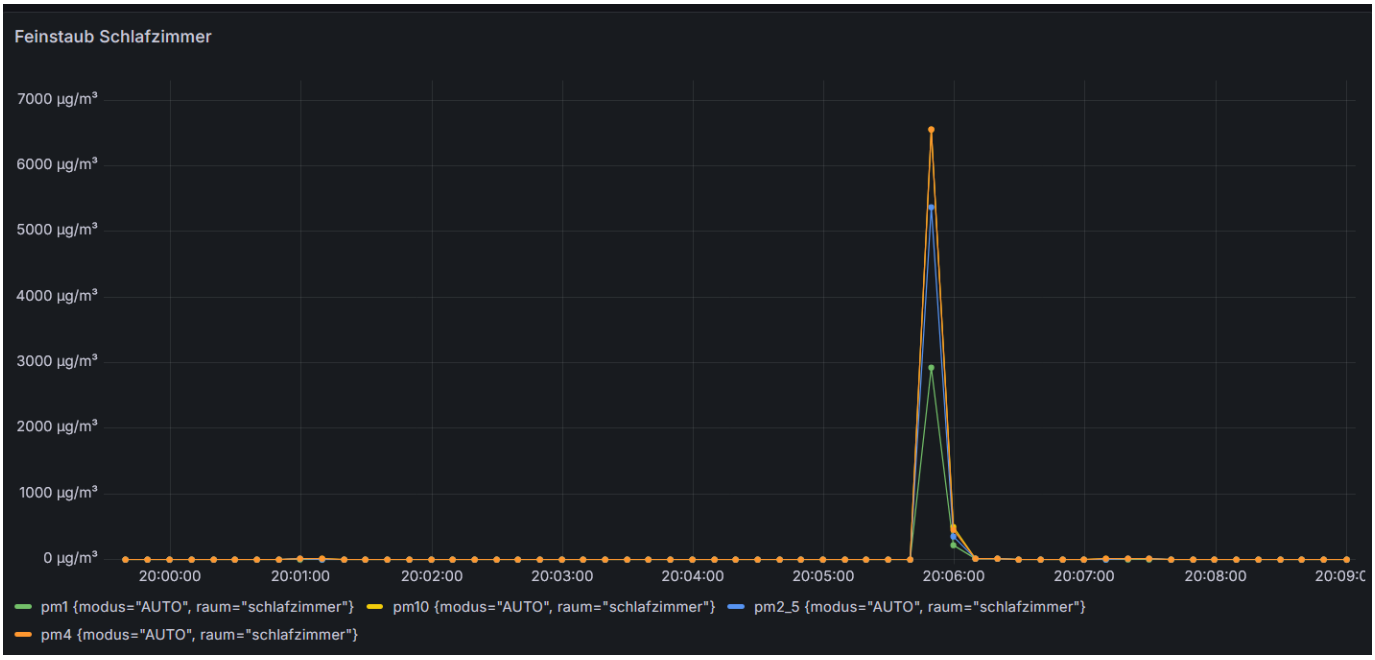


Abbildung 59 / Visualisierung im Feinstaub Schlafzimmer, sprunghafte Reaktion durch das anzünden eines Streichholzes



Abbildung 60 / Visualisierung in InfluDB, analog zum Grafana Panel Feinstaub, die sprunghafte Feinstaub-Messwerte mit Zeitstempel und max. Lüfterstufen vom Streichholz

2.3.3 Filterüberwachung und Zuluftqualität

Filterüberwachung

Die Filterüberwachung wurde durch eine gezielte Veränderung des Strömungswiderstands zwischen den beiden BME280-Druckmessstellen getestet. Dazu wurden drei unterschiedliche Sperrholzplättchen eingesetzt. Diese bildeten eine weitgehend offene Luftführung, eine teilweise eingeschränkte Luftführung und eine vollständige Unterbrechung des Luftwegs nach.

Testzustand	**Eingesetztes Sperrholzplättchen**	**Zweck**	**Meldung**
Offener Luftweg	Plättchen 3 mit grosser Öffnung in der Mitte	Vergleichszustand mit geringem zusätzlichen Strömungswiderstand	«Filter in Ordnung»
Eingeschränkter Luftweg	Plättchen 2 mit kleiner Öffnung in der Mitte	Simulation eines erhöhten Strömungswiderstands	«Filter muss bald ersetzt werden»
Geschlossener Luftweg	Geschlossenes Plättchen 1 ohne Öffnung	Simulation einer vollständigen Blockierung des Luftwegs	«Filter verstopft-muss ersetzt werden»

Tabelle 21 / Filterüberwachungstest

Mit diesen drei Zuständen wurden die drei Bewertungsstufen der Filterüberwachung geprüft. Die Veränderungen der Statusmeldungen wurden in Grafana beobachtet und durch Screenshots dokumentiert. Damit konnte gezeigt werden, dass die druckbasierte Auswertung auf die mechanisch veränderten Strömungsbedingungen reagiert.

Die Sperrholzplättchen simulieren unterschiedliche Strömungswiderstände, jedoch keine tatsächliche Filterverschmutzung. Der Test ist deshalb als Funktionsnachweis der Differenzdruckauswertung und Statusanzeige zu verstehen. Er belegt nicht, dass dieselben Schwellen bei einem realen Filter einen bestimmten Verschmutzungsgrad oder einen notwendigen Austausch zuverlässig anzeigen.

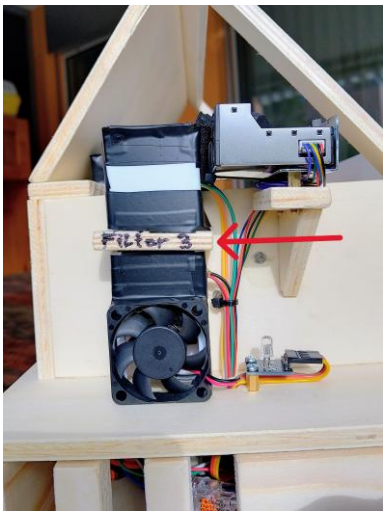


Abbildung 61 / Filterüberwachung

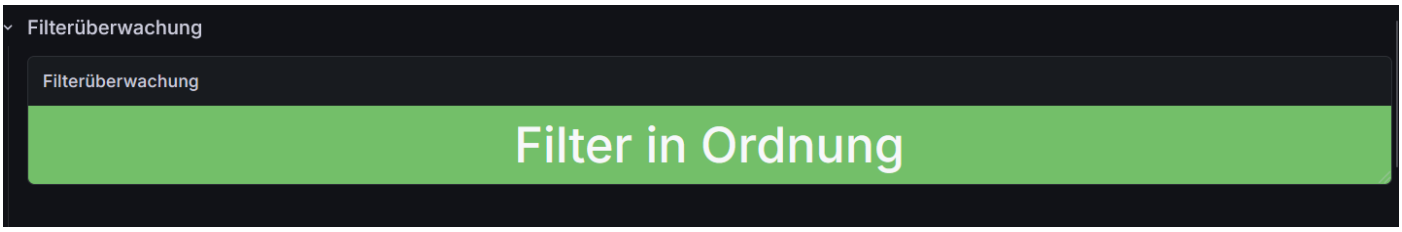


Abbildung 62 / Test Filterüberwachung "Filter in Ordnung"

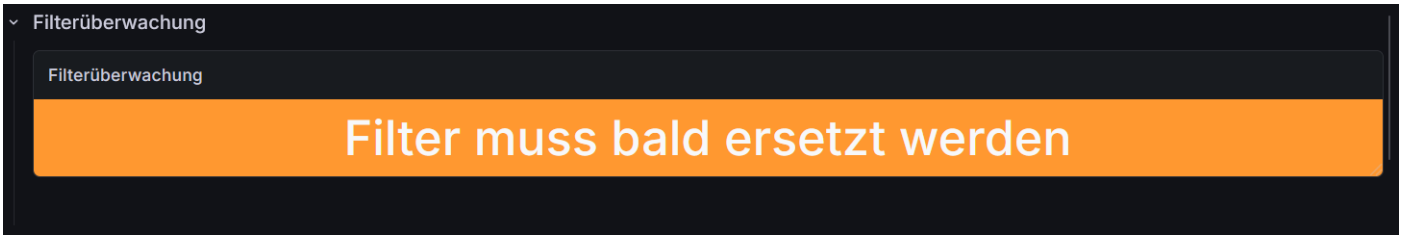


Abbildung 63 / Filterüberwachung "Filter muss bald ersetzt werden"

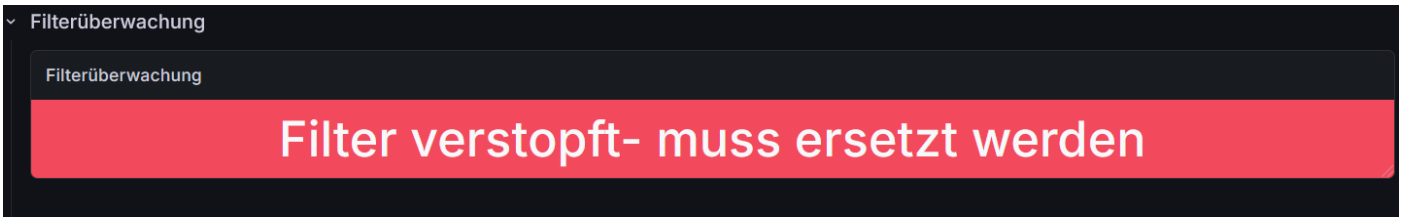


Abbildung 64 / Filterüberwachung "Filter verstopft- muss ersetzt werden"

Zuluftqualität

Die Zuluftbewertung wurde separat durch einen Testeinfluss mit Nagellackentferner überprüft. Dabei stieg der VOC-Index des Sensors im Frischluftkanal an. Die zugehörige Meldung wechselte auf „belastet“. Der Messwertanstieg und die Statusänderung wurden mit Grafana-Screenshots festgehalten.



Abbildung 65 / Test Zuluftstatus «Zuluft belastet» VOC 236

Dieser Versuch zeigt, dass die Zuluftbewertung auf einen erhöhten VOC-Index reagiert. Er bestätigt jedoch weder eine bestimmte absolute VOC-Konzentration noch eine VOC-Abscheidung durch den Filter.

Filterüberwachung und Zuluftqualität sind daher getrennt zu interpretieren:

- Die Filterüberwachung bewertet den berechneten Druckunterschied anhand der hinterlegten Prototypschwellen.
- Die Zuluftbewertung beschreibt die gemessene Luftbelastung nach dem Filter anhand der verwendeten PM- und VOC-Werte.

Ein erhöhter VOC-Index ist somit kein Nachweis einer Filterverstopfung. Umgekehrt beschreibt eine druckbasierte Statusänderung nicht unmittelbar die chemische Qualität der Zuluft.

2.3.4 Nachtkühlung

Die Nachtkühlung wurde firmwareseitig implementiert. Die Funktion berücksichtigt einen zuvor gemerkten Hitzetag, die Raum- und Frischlufttemperatur, den Temperaturunterschied sowie die Bewertung der Zuluft. Bei erfüllten Freigabebedingungen soll der Zentrallüfter die entsprechende Kühlungsstufe anfordern.

Aus zeitlichen Gründen konnte der vorgesehene Funktionstest mit gekühlter Zuluft nicht durchgeführt werden. Daher liegen keine experimentellen Nachweise zur Aktivierung, Stufenauswahl oder Abschaltung der Nachtkühlung am Modell vor.

Die Funktion ist folglich als implementiert, aber nicht praktisch validiert einzuordnen. Aus dem vorhandenen Programmcode kann die vorgesehene Arbeitsweise beschrieben werden, ein erfolgreicher Betrieb oder eine tatsächlich erzielte Kühlwirkung darf daraus jedoch nicht abgeleitet werden. Der Test mit kontrollierten Temperaturbedingungen bleibt eine mögliche weiterführende Arbeit.

2.3.5 Nachweis der Projektziele

Die Funktionstests zeigen, dass der Prototyp Änderungen der Raumluftwerte erfasst und für die modellhafte Regelung verwendet. Die überwiegend auf einen Raum begrenzten Testeinflüsse veranschaulichen dabei die raumbezogene Auswertung. Die Grafana-Screenshots dokumentieren die Messwertverläufe sowie die beobachteten Statusänderungen.

Projektziel	**Vorliegender Nachweis**	**Bewertung**
Muss: Raumklimawerte erfassen und modellhafte Lüftung beziehungsweise Luftwäscher automatisch ansteuern	Funktionstests für CO_2, Feuchte, VOC und Feinstaub, beobachtete Lüfterreaktionen und LEDs	Grundsätzliche Funktion nachgewiesen. Keine vollständige Kalibrierung oder Prüfung sämtlicher Schaltgrenzen.
Muss: Demonstrationsmodell im Massstab 1:30 aufbauen und dokumentieren	Praktische Versuche am aufgebauten Prototyp	Aufbau vorhanden, Fotos und Abmessungen ergänzen den Nachweis.
Zusätzlich Muss: Reaktionen anhand definierter Testsituationen zeigen	Beschriebene Testeinflüsse und dokumentierte Messwertverläufe	Funktionsnachweise vorhanden.
Kann: Messdaten mit Raspberry Pi und InfluxDB speichern sowie mit Grafana visualisieren und analysieren	Grafana-Zeitreihen der Versuche, ergänzender Speicherbeweis mit InfluxDB-Abfrage	Datenverarbeitung und Visualisierung dokumentiert.
Kann: Das Modell auf drei Räume mit unterschiedlichen Prioritäten abbilden	Zwei getrennte Modellräume, überwiegend einseitige Testeinflüsse zur Darstellung der raumbezogenen Regelung	Mehrraumfunktion veranschaulicht. Eine besondere Priorisierung des Schlafzimmers gegenüber dem Wohnzimmer ist noch nicht belegt.

Tabelle 22 / Nachweis Projektziele

Zusätzlich wurden die druckbasierte Filterüberwachung und die VOC-basierte Zuluftbewertung praktisch getestet. Die Nachtkühlung bleibt hingegen auf die firmwareseitige Umsetzung beschränkt.

Insgesamt zeigen die Versuche, dass der Prototyp die angestrebte Verknüpfung von Messwerterfassung, Datenvisualisierung und modellhafter Lüfterregelung nachvollziehbar demonstriert. Die Ergebnisse zeigen eine funktionierende Umsetzung des Demonstrationssystems. Sie erlauben jedoch keine unmittelbare Aussage über die erreichbare Luftqualität, Kühlleistung oder Energieeinsparung in einer realen Wohnung.

3 Schlussteil

3.1 Diskussion

Die praktischen Versuche zeigen, dass der Prototyp die grundlegende Verbindung zwischen Raumklimamessung, Datenverarbeitung und automatischer Lüfteransteuerung umsetzt. Veränderungen von CO_2, relativer Luftfeuchtigkeit, VOC-Index und Feinstaub wurden von den Sensoren erfasst und in Grafana sichtbar dargestellt. Bei den beschriebenen CO_2- und Feuchteversuchen wurden zudem Lüfterreaktionen beobachtet. Die auf einen Modellraum begrenzten Testeinflüsse veranschaulichten die raumbezogene Messwerterfassung und Regelung.

Die Ergebnisse sind jedoch als qualitative Funktionsnachweise einzuordnen. Die eingesetzten Testeinflüsse erzeugten keine bekannten Referenzkonzentrationen. Atemluft verändert beispielsweise nicht nur die CO_2-Konzentration, sondern auch Feuchtigkeit und Temperatur. Somit lässt sich zwar die Reaktion des Systems beobachten, daraus aber keine genaue Sensorabweichung oder Reaktionszeit unter standardisierten Bedingungen bestimmen. Auch eine vollständige Prüfung aller Schaltgrenzen ist durch die einzelnen Versuche nicht nachgewiesen.

Die Filterüberwachung reagierte auf die unterschiedlichen Strömungswiderstände der eingesetzten Sperrholzplättchen. Die Statusänderungen wurden in Grafana dokumentiert. Damit konnte die Funktion der druckbasierten Auswertung gezeigt werden. Die Plättchen simulierten allerdings eine Einschränkung des Luftwegs und keine tatsächliche Filterverschmutzung. Die verwendeten Schwellen lassen sich deshalb nicht ohne weitere Untersuchungen auf reale Filterzustände übertragen. Zusätzlich bleibt die Messunsicherheit relevant, da der Differenzdruck aus zwei absoluten BME280-Druckwerten berechnet wird.

Die Zuluftbewertung wurde getrennt davon überprüft. Nach dem Testeinfluss durch Nagellackentferner stieg der VOC-Index an und die Meldung wechselte auf „belastet“. Dieser Versuch bestätigt die Reaktion der Zustandsbewertung, jedoch weder eine absolute VOC-Konzentration noch eine Filterwirkung. Die Trennung zwischen druckbasierter Filterüberwachung und gemessener Zuluftqualität ist daher für die Interpretation wesentlich.

Die Nachtkühlung stellt eine Einschränkung der praktischen Validierung dar. Sie wurde firmwareseitig implementiert, konnte aus zeitlichen Gründen jedoch nicht mit gekühlter Zuluft getestet werden. Eine Aussage über ihre tatsächliche Funktion oder Kühlwirkung am Modell ist deshalb nicht möglich.

Auch die Übertragbarkeit des Gesamtmodells ist begrenzt. Die kleinen Lüfter stellen die Betriebszustände von Komfortlüftung und Luftwäschern modellhaft dar. Sie ersetzen keine vollständige Lüftungsanlage und keinen realen Luftwäscher. Aus den Versuchen können daher keine unmittelbaren Aussagen über Luftreinigung, Befeuchtungsleistung oder Energieeinsparungen in einer Wohnung abgeleitet werden

3.2 Schlussfolgerung

Mit der Diplomarbeit habe ich ein vernetzter Prototyp aufgebaut, der Raumklimawerte erfasst, speichert, visualisiert und zur modellhaften Lüfterregelung verwendet. Die Architektur verbindet einen Arduino als lokale Steuerung mit einem Raspberry Pi als Plattform für Datenhaltung, Visualisierung und Bedienung.

Die Funktionstests zeigen, dass das System auf veränderte Umgebungsbedingungen reagiert. Die getrennten Sensoren und Aktoren der beiden Modellräume ermöglichen eine raumbezogene Verarbeitung. Darüber hinaus konnten die Filterstatusanzeige und die Bewertung der Zuluftqualität praktisch überprüft werden.

Die zentrale Zielsetzung, die Verknüpfung von Raumluftmessung und bedarfsgerechter Aktoransteuerung anschaulich darzustellen, wurde damit grundsätzlich erreicht. Die Messwertverläufe und Statusänderungen lassen sich in Grafana nachvollziehen.

Die Arbeit zeigt zugleich den Unterschied zwischen einer implementierten Funktion und einer praktisch nachgewiesenen Funktion. Während wesentliche Systempfade am Prototyp geprüft wurden, bleibt die Nachtkühlung ohne experimentellen Nachweis. Ebenso erfordern eine quantitative Bewertung der Messgenauigkeit und eine Übertragung auf reale Wohnräume zusätzliche Untersuchungen.

Der Prototyp erfüllt somit seine Aufgabe als Demonstrationssystem. Er bildet eine Grundlage für weitere Versuche, ist jedoch nicht als validierte, produktionsreife Raumklimaregelung geeignet.

3.3 Empfehlungen und Ausblick

Für die Weiterentwicklung sollte zunächst die experimentelle Absicherung der bestehenden Funktionen im Vordergrund stehen. Neue Funktionen sind erst dann sinnvoll zu ergänzen, wenn die vorhandenen Mess- und Regelungspfade ausreichend dokumentiert und überprüft sind.

Empfehlung	**Nutzen**
Systematische Schwellentests durchführen	Messwerte unmittelbar unter, an und über den Schaltgrenzen prüfen, und nachvollziehbar belegen
Versuche mehrfach wiederholen	Wiederholbarkeit beurteilen und zufällige Einflüsse besser erkennen
Filterdruckmessung weiter untersuchen	Nullpunkt, unterschiedliche Lüfterstufen und Strömungswiderstände vergleichen, bei Bedarf einen geeigneten Differenzdrucksensor prüfen
Nachtkühlung praktisch testen	Freigabe, Abschaltung, Stufenauswahl und Reset-Verhalten unter kontrollierten Temperaturbedingungen nachweisen
Stromaufnahme beider Versorgungszweige messen	Tatsächliche Last und Reserve statt ausschliesslich datenblattbasierter Ansätze bestimmen
Datensicherung und Wiederherstellung prüfen	Nicht nur die Erstellung von Backups, sondern auch die erfolgreiche Wiederherstellung nachweisen
Schutz für einen erweiterten Einsatz verbessern	Authentifizierung, Netzwerkzugriff und Umgang mit Zugangsdaten für einen Betrieb ausserhalb des Demonstrationsnetzes anpassen

Tabelle 23 / Empfehlungen

Für einen längeren Betrieb können ausserdem ein robusterer Datenträger wie SSD und eine vom Raspberry Pi unabhängige Arduino-Versorgung geprüft werden. Letztere würde die lokale Regelung auch bei einem vollständigen Ausfall der Pi-Stromversorgung unterstützen. Zusätzlich wäre siecher der Einsatz von 12V Axiallüfter, statt den 5V einzusetzen. Das würde die jetzigen hohen PWM-Lüfterstufen heruntersetzen was eine bessere Abgrenzung und anderseits mehr Luftdruck erzeugen würde. Der Nutzen dieser Anpassungen ist gegen zusätzlichen Aufwand und Komplexität gegenüberzustellen.

Lessons Learnd - Erkenntnisse aus der Umsetzung

Aus dem Projekt lassen sich mehrere technische und methodische Erkenntnisse ableiten:

- Klare Zuständigkeiten erleichtern die Integration. Die Trennung zwischen Arduino-Regelung und Raspberry-Pi-Serverdiensten macht die einzelnen Aufgaben nachvollziehbar und vereinfacht die Fehlersuche.
- Schnittstellen müssen ebenso sorgfältig geplant werden wie Komponenten. Versorgungsspannungen, gemeinsame Masse, I²C-Adressen, Pegelwandlung und die Belegung des seriellen Ports sind entscheidend für das Zusammenspiel.
- Datenblattwerte und Messergebnisse erfüllen unterschiedliche Aufgaben. Datenblätter unterstützen die Auswahl und Auslegung. Sie ersetzen weder Strommessungen am aufgebauten System noch die Prüfung der Regelung unter tatsächlichen Betriebsbedingungen.
- Ein sichtbarer Messwertanstieg ist noch keine Kalibrierung. Ein Testreiz kann die grundsätzliche Sensorreaktion zeigen. Für Aussagen zur Genauigkeit sind bekannte Referenzen und dokumentierte Messbedingungen erforderlich.
- Die Evaluierung der Sensoren sollte früh möglichst und gut überlegt durchgeführt werden. Dadurch hätte es ev. der eine oder andere Sensor nicht benötigt.
- Testzeit muss früh eingeplant werden. Die nicht durchgeführte Nachtkühlungsprüfung zeigt, dass Implementierung und Integration nicht die gesamte verfügbare Zeit beanspruchen sollten. Für Validierung, Wiederholungen und Ergebnisdokumentation ist eine genügende Reserve einzuplanen.

Die wichtigste Erkenntnis ist damit, dass ein überzeugender Prototyp nicht allein durch funktionierende Software entsteht. Erst das Zusammenspiel aus sauberem Aufbau, klaren Schnittstellen, reproduzierbaren Tests und nachvollziehbarer Dokumentation ermöglicht eine aussagekräftige Beurteilung.

4 Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne fremde Hilfe, verfasst sowie keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen benutzt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäss aus veröffentlichten oder noch nicht veröffentlichten Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht vorgelegt worden.

Münsingen, 02.11.2026



Mario Wicki

5 Verzeichnisse und Hilfsmittel

5.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 / Sperrholz-Modell im Massstab 1:30 0
Abbildung 2 / Venta Luftwäscher / Befeuchter 10
Abbildung 3 / Provisorisches Modell aus Karton im Massstab 1:30 13
Abbildung 4 / Zeitplanungsdiagramm 14
Abbildung 5 / Provisorisches Modell aus Karton im Massstab 1:30 15
Abbildung 6 / Arduino UNO R4 Wifi 18
Abbildung 7 / Raspberry Pi 4 2GB 19
Abbildung 8 / SCD-41 Sensor von Adafruit 19
Abbildung 9 / Messprinzip CO2 von Sensirion 19
Abbildung 10 / SEN54 Sensor von Sensirion 20
Abbildung 11 / Messprinzip Temperatur und Luftfeuchtigkeit von Sensirion 20
Abbildung 12 / Messprinzip VOC von Sensirion 21
Abbildung 13 / Messprinzip Feinstaub von Sensirion 21
Abbildung 14 / ENS160+BME280 DFRobot-Fermion-Kombiboard 21
Abbildung 15 / BME280 Sensor von Bosch 22
Abbildung 16 / TCA9548A Multiplexer 22
Abbildung 17 / Logic-Level-Converter 22
Abbildung 18 / Axiallüfter von Sunon 23
Abbildung 19 / Whadda-Leistungstreiber VMA411 23
Abbildung 20 / Iduino RGB-LED Modul 23
Abbildung 21 / Netzteil MEAN WELL RS-15-5 23
Abbildung 22 / Ansicht Prototyp-Modell 25
Abbildung 23 / Grundriss Dusche/WC im Massstab 1:30 25
Abbildung 24 / Grundriss Wohn- und Schlafzimmer im Massstab 1:30 25
Abbildung 25 / Grundriss Küche im Massstab 1:30 26
Abbildung 26 / Prototyp-Modell Ansicht Seite links Frischluftzufuhr 26
Abbildung 27 / Prototyp-Modell Ansicht Front 26
Abbildung 28 / Prototyp-Modell Ansicht Seite rechts 26
Abbildung 29 / Prototyp-Modell Ansicht hinten 26
Abbildung 30 / Prototyp-Modell Ansicht oben seitlich 27
Abbildung 31 / Prototyp-Modell Ansicht oben 27
Abbildung 32 / Verdrahtung Netzteil 27
Abbildung 33 / Schema betreffend SEN54 Verdrahtung 28
Abbildung 34 / Rückseite Fermion-Kombioard mit der Lötbrücke zur Adressänderung 28
Abbildung 35 / Verdrahtung Lüftertreiber 30
Abbildung 36 / Aufbau eines Zimmers, Lüfter, RGB-LED und SCD-41 sowie SEN54 30

Abbildung 37 / InfluxDB Visualisierung/ Eingang der Messwerte *37*
Abbildung 38 / Ablaufdiagramm Backup *37*
Abbildung 39 / Dashboard Panels CO2, VOC, Temp. und Luftfeuchtigkeit pro Raum *39*
Abbildung 40 / Dashboard Panels Feinstaub pro Raum *39*
Abbildung 41 / Dashboard Panel Filterüberwachung, Meldung "Filter in Ordnung" *39*
Abbildung 42 / Dashboard Panel Luftdruck und Differenzdruck *40*
Abbildung 43 / Dashboard Panel Zuluftqualität, "Zuluftqualität gut" *40*
Abbildung 44 / Node-Red Bedienoberfläche Filterüberwachung *41*
Abbildung 45 / JSON Nachricht "schlafzimmer" *43*
Abbildung 46 / JSON Nachricht "wohnzimmer" *43*
Abbildung 47 / JSON Nachricht "frischluft" *43*
Abbildung 48 / InfluxDB CO_2-Werte des Wohnzimmers aus den letzten 30 Minuten *44*
Abbildung 49 / InfluxDB Tabellenansicht mit 10s Zeitstempel *44*
Abbildung 50 / CO2 Messwerte der letzten 30min in Grafana *45*
Abbildung 51 / Test anhauchen des SCD-41 im Schlafzimmer, CO2 wert stieg sofort auf 2` 590ppm sowie die Luftfeuchtigkeit 56%, Daten InfluxDB *46*
Abbildung 52 / Zentrallüfter AUS, rote LED *46*
Abbildung 53 / Zentrallüfter Betriebsstufe 3, blaue LED *46*
Abbildung 54 / Messdaten und Zeitstempel in InfluxDB, absinken der Luftfeuchtigkeit und das dadurch erhöhen der Lüfterstufen *47*
Abbildung 55 / Grafana Visualisierung absinken der Luftfeuchtigkeit unter 40% *47*
Abbildung 56 / Visualisierung in InfluxDB, VOC-Test mit Nagellackentferner, der VOC wert stieg entsprechend an, auch die Lüfterstufen erhöhten sich auf 3 resp. 2 ..... *48*
Abbildung 57 / VOC Panel in Grafana, entsprechend analog zu InfluxDB abgebildet *48*
Abbildung 58 / Visualisierung im Panel Feinstaub Wohnzimmer, Reaktion der Feinstaub Messwerte durch das misten der Meerschweinchen Kiste *49*
Abbildung 59 / Visualisierung im Feinstaub Schlafzimmer, sprunghafte Reaktion durch das anzünden eines Streichholzes *50*
Abbildung 60 / Visualisierung in InfluDB, analog zum Grafana Panel Feinstaub, die sprunghafte Feinstaub-Messwerte mit Zeitstempel und max. Lüfterstufen vom Streichholz *50*
Abbildung 61 / Filterüberwachung *51*
Abbildung 62 / Test Filterüberwachung "Filter in Ordnung" *51*
Abbildung 63 / Filterüberwachung "Filter muss bald ersetzt werden" *52*
Abbildung 64 / Filterüberwachung "Filter verstopft- muss ersetzt werden" *52*
Abbildung 65 / Test Zuluftstatus «Zuluft belastet» VOC 236 ..... *52*

5.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 / Arbeitsaufwand 13
Tabelle 2 / Kostenaufwand 14
Tabelle 3 / Zielsetzung und Umsetzung 16
Tabelle 4 / Abgrenzung Kernkomponenten 17
Tabelle 5 / Detaillierte Komponentenwahl 18
Tabelle 6 / Leistungsbilanz Netzteile 24
Tabelle 7 / Verdrahtung Stromversorgung 28
Tabelle 8 / Verdrahtung I2C Bus und Sensoren 29
Tabelle 9 / Ausgangs Pins Arduino 29
Tabelle 10 / Lüfterstufen (PWM) 30
Tabelle 11 / Verdrahtung Lüftertreiber und RGB-LEDs 31
Tabelle 12 / Firmware Umgebungen 31
Tabelle 13 / Rgelungslogik Raumklima 33
Tabelle 14 / Dienst im System 35
Tabelle 15 / Übersicht Grafan Panels 38
Tabelle 16 / Node-RED Bedienoberfläche 41
Tabelle 17 / Testverfahren 42
Tabelle 18 / Datenfluss 42
Tabelle 19 / JSON-Nachricht 43
Tabelle 20 / Funktionstest Regelungslogik 46
Tabelle 21 / Filterüberwachungstest 51
Tabelle 22 / Nachweis Projektziele 53
Tabelle 23 / Empfehlungen 56

5.3 Quellenverzeichnis

Adafruit. (2016). *ADAFRUIT TCA9548A 1-to-8 I2C Multiplexer Breakout*.

Adafruit. (2026). *Adafruit SCD-41, CO2-Sensor, 400-5000 ppm, ±40ppm + 5%, Temperatur- und Feuchtig... - Kaufen bei BerryBase*. BerryBase - The Maker Shop. https://www.berrybase.ch/adafruit-scd-41-co2-sensor-400-5000-ppm-40ppm-5-temperatur-und-feuchtigkeitssensor-3-3-5v

Arduino. (2026, Oktober 30). *localhost:8123/ABX00087/navvq-datasheet.html—ABX00087-datasheet.pdf*. https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/ABX00087-datasheet.pdf?_gl=1*19t4yaa*_up*MQ..*_ga*NDMwNTIyNTQ3LjE3OTMzOTMxMTI.*_ga_NEXN8H46L5*czE3OTMzOTMxMTAkbzEkZzAkdDE3OTMzOTMxMTAkajYwJGwwJGgxNjUyNjQwMDM0

BAFU. (2024). *Immissionsgrenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung (LRV)*. https://www.bafu.admin.ch/de/immissionsgrenzwerte-der-luftreinhalte-verordnung-lrv

BAG. (2022). *Faktenblatt richtig lüften*. https://www.bag.admin.ch/dam/de/sd-web/ylZTxH8jiD0T/faktenbaltt-richtig-lueften.pdf

Bundesamt für Umwelt (BAFU), & Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa). (2025). *Luftqualität 2024*. www.bafu.admin.ch/uz-2522-d

DFRobot. (2026). *ENS160 & BME280 Sensor: Unmatched Air Quality Monitoring*. https://www.dfrobot.com/product-2064.html

Docker Compose. (100 n. Chr.). Docker Documentation. https://docs.docker.com/compose/

Ganz Klima GmbH. (2007). Schlussbericht Raumluftfeuchte in Wohnneubauten. *Baudirektion Kanton Zürich & MINERGIE Agentur Bau*.

Hoval Schweiz. (o. J.). *Auf diese fünf Aspekte sollte man beim Raumklima achten | Hoval Schweiz*. Raumklima-verbessern. Abgerufen 21. Oktober 2026, von https://www.hoval.ch/de_CH/blog/raumklima-verbessern

Huber, H. (2021). *Wohnungslüftung: Planung, Ausführung, Betrieb*. Faktor Verlag.

Hunziker, A. W. (2023). *Spass am wissenschaftlichen Arbeiten*. Verlag SKV AG.

Iduino. (o. J.). *Bedienungs-und-sicherheitshinweise-1616253-iduino-se010-rgb-led-modul-1-st*. Abgerufen 1. November 2026, von https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/001616253ML01/bedienungs-und-sicherheitshinweise-1616253-iduino-se010-rgb-led-modul-1-st.pdf

Ltd, R. P. (o. J.). *Buy a Raspberry Pi 4 Model B*. Raspberry Pi. Abgerufen 22. Oktober 2026, von https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/

MEAN WELL. (2022). *RS-15-20220920.cdr—Datenblatt-1297280-mean-well-rs-15-5-schaltnetzteil-5-vdc-3-a-15-w.pdf*. https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/001297280DS01/datenblatt-1297280-mean-well-rs-15-5-schaltnetzteil-5-vdc-3-a-15-w.pdf

MEAN WELL RS-15-5 Schaltnetzteil 5 V/DC 3 A 15 W – Conrad Electronic Schweiz. (o. J.). Conrad Electronic » Alle Teile des Erfolgs. Abgerufen 1. November 2026, von https://www.conrad.ch/de/p/mean-well-rs-15-5-schaltnetzteil-5-v-dc-3-a-15-w-1297280.html

Minergie-P. (2026). Minergie. https://www.minergie.ch/de/standards/neubau/minergie-p/

Mouser Electronis, Inc., S. A. (2026, Mai). *Schlafqualität & CO2 – Für erholsamen Schlaf*. https://www.mouser.ch/sensirion-sleep-quality-co2-sensors

Purecra. (o. J.). *Logic Level Converter 2-Channel 5V / 3.3V - Bastelgarage Electronics Online Store*. Abgerufen 1. November 2026, von https://www.bastelgarage.ch/logic-level-converter-2-channel-5v-3-3v

Raspberry Pi. (2024, März). *RP-008341-DS-1-raspberry-pi-4-datasheet*. https://pip-assets.raspberrypi.com/categories/545-raspberry-pi-4-model-b/documents/RP-008341-DS-1-raspberry-pi-4-datasheet.pdf

Sensirion AG, S. (o. J.-a). *Info_Note_VOC_Index*. Abgerufen 2. November 2026, von https://sensirion.com/media/documents/02232963/6294E043/Info_Note_VOC_Index.pdf

Sensirion AG, S. (o. J.-b). *What is Sensirion's VOC Index.pdf*. Abgerufen 21. Oktober 2026, von https://sensirion.com/media/documents/02232963/6294E043/Info_Note_VOC_Index.pdf

Sensirion AG, S. (2022). *Sensirion_Datasheet_Environmental_Node_SEN5x*. https://sensirion.com/de/produkte/katalog/SEN54

Sensirion AG, S. (2024). *SCD4x Data Sheet—P6512+CD_DS_SCD4x_Datasheet_D1*.

Sensirion AG, S. (2026a). *SEN54—Umweltsensormodul für HLK und Luftqualitätsanwendungen*. https://sensirion.com/de/produkte/katalog/SEN54

Sensirion AG, S. (2026b). *Sensirion—Smart Sensor Solutions*. Sensirion AG. https://sensirion.com/products/technology

Sensortec, B. (2015). *Combined humidity and pressure sensor*.

Sparkfun, Electronics. (o. J.). *RETIRED - Using the Logic Level Converter—SparkFun Learn*. Abgerufen 1. November 2026, von https://learn.sparkfun.com/tutorials/retired---using-the-logic-level-converter

Sunon. (2017a). *Sunon MF30100V1-1000U-A99 Axiallüfter 5 V/DC 9.34 m^3/h (L x B x H) 10 x 30 x 30 mm kaufen*. Elektronik & Technik bei Conrad » Zum Online-Shop. https://www.conrad.de/de/p/sunon-mf30100v1-1000u-a99-axialluefter-5-v-dc-9-34-m-h-l-x-b-x-h-10-x-30-x-30-mm-2992700.html

Sunon. (2017b). *Sunon MF40100V1-1000U-A99 Axiallüfter 5 V/DC 13.6 m^3/h (L x B x H) 40 x 40 x 10 mm – Conrad Electronic Schweiz*. Conrad Electronic » Alle Teile des Erfolgs. https://www.conrad.ch/de/p/sunon-mf40100v1-1000u-a99-axialluefter-5-v-dc-13-6-m-h-l-x-b-x-h-40-x-40-x-10-mm-2147540.html

TEKO. (2026). *TEKO Dipl. Systemtechniker/in HF Professional Bachelor*. https://teko.ch/technik/bildungsgaenge-hf-technik/systemtechnik/3382107

Venta Air GmbH. (2026). *Premium Venta Luftbefeuchter für ihr Raumklima zum Wohlfühlen*. Venta-Luftwäscher AG. https://www.venta-air.com/de_ch/Produkte/Luftbefeuchter/

webmaster@reichelt.de, reichelt elektronik G. I. T. (2016). *ADAFRUIT Entwicklerboards—I2C-Multiplexer, TCA9548A | Erweiterungsboards günstig kaufen | reichelt elektronik*. https://www.reichelt.com/ch/de/shop/produkt/entwicklerboards_-_i2c-multiplexer_tca9548a-235517

Whadda. (o. J.). *Whadda WPM411 Motortreiber 1 St. – Conrad Electronic Schweiz*. Conrad Electronic » Alle Teile des Erfolgs. Abgerufen 1. November 2026, von https://www.conrad.ch/de/p/whadda-wpm411-motortreiber-1-st-2330793.html

Zehnder Group Schweiz AG. (2025, Oktober). *Zehnder_CSY_ComfoAir_350_TES_CH_de*.

5.4 Hilfsmittel und Tools

Docker Compose zur Konfiguration und Verwaltung mehrerer Docker-Container. https://docs.docker.com/compose/

Grafana Browserbasierte Erstellung und Visualisierung der einzelnen Panels der Messgrössen. https://grafana.com/grafana/dashboards/

InfluxDB speichert die erfassten Messwerte als Zeitreihen mit Zeitstempel und stellt sie für die Auswertung und Visualisierung in Grafana bereit. https://www.influxdata.com/lp/influxdb-database/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=intl_search_brand&utm_content=brand&cq_con=80283333548&cq_term=influxdb&cq_med=&cq_plac=&cq_net=g&cq_plt=gp&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=UP%20-%20Intl%20Search%20%7C%20Brand-Related%20-%20InfluxDB%20Cloud%20Free%20Tier&utm_term=influxdb&gad_source=1&gad_campaignid=20312307722&gclid=EAIaIQobChMI49jE2oPplwMVFM5EBx3dTQ02EAAYASAAEgLId_D_BwE

Mosquitto MQTT Vermittelt Bedienbefehle, Messdaten und Statusmeldungen zwischen Node-RED und der Serial-Bridge auf dem Raspberry Pi. https://mosquitto.org/

Node-RED FlowFuse Dashboard Browserbasierte Bedienoberfläche, für die Filterüberwachung, Interaktion mit dem Raspberry Pi. https://dashboard.flowfuse.com/

Raspberry Pi OS Betriebssystem OS Lite 64bit fürs Raspberry Pi 4. https://www.raspberrypi.com/software/operating-systems/

Serial-Bridge Software zur Vermittlung zwischen einer seriellen Verbindung und weiteren Schnittstellen. https://serial-bridge.readthedocs.io/en/latest/

VS-Code Zur Programmierung des Arduino und Raspberry Pi, sowie die drei Sketches. https://code.visualstudio.com/?_exp_home=e855cfac50

Zotero Hilfsmittel für Quellenverzeichnis, https://www.zotero.org/

KI Generative KI bei VS-Code, benutzt zur Erstellung der drei Sketches, sowie zum Recherchieren von Informationen. https://code.visualstudio.com/docs/agents/overview

Online-Raumplaner Zur Erstellung der Grundrisse der Wohnung. https://remplanner.com/de/planner/

Drawio Zur Erstellung von Schemas und Diagramme. https://app.diagrams.net/

6 Anhang

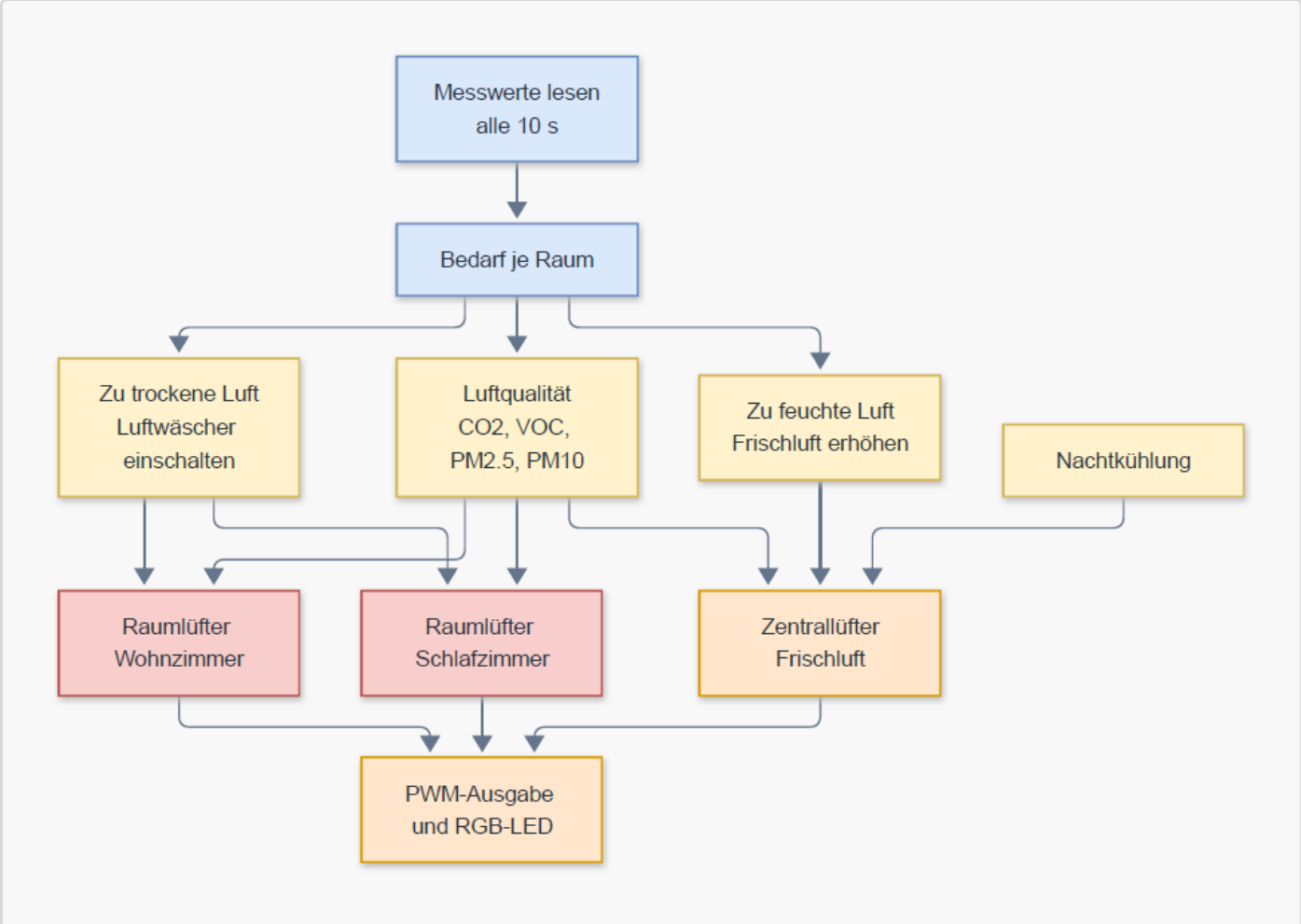
Anhang A Themeneingabe

«TE_2026_Wicki Mario», digital via Extranet am 26.05.2026 eingereicht.

Anhang B Firmware Umgebung

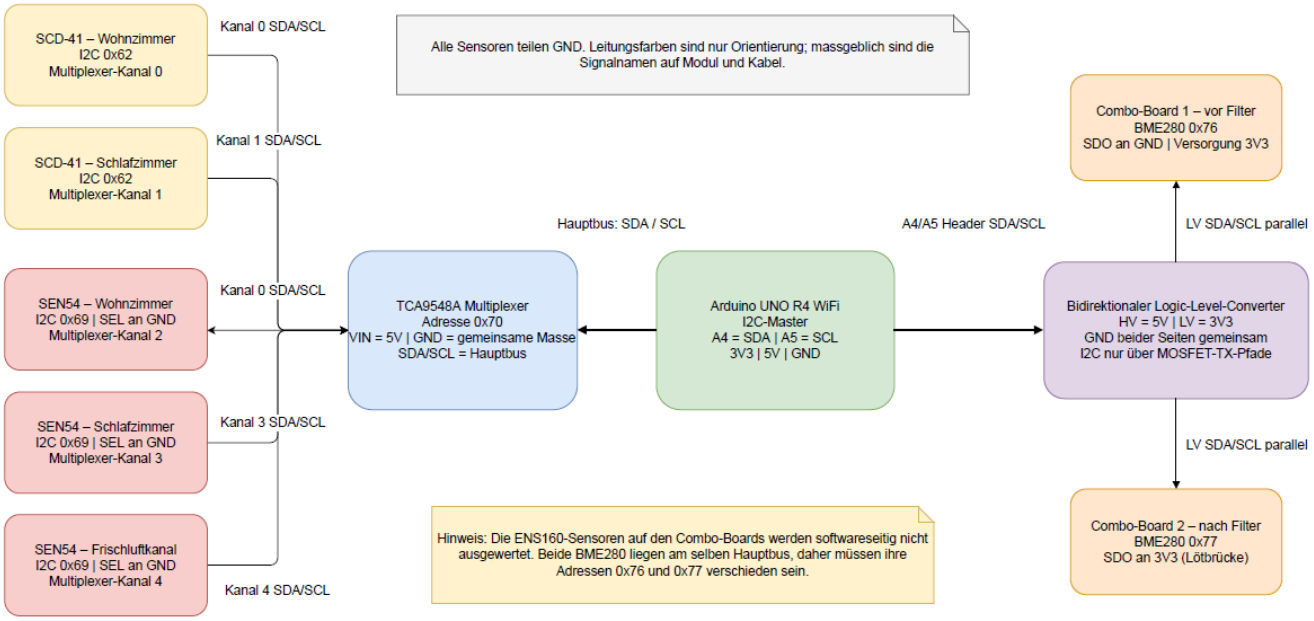
Die drei Sketches «src/main.cpp, src/logger.cpp, src/auto_control.cpp» digital via Extranet Teko am 02.11.2026 eingereicht

Anhang C Diagramm Regelungslogik

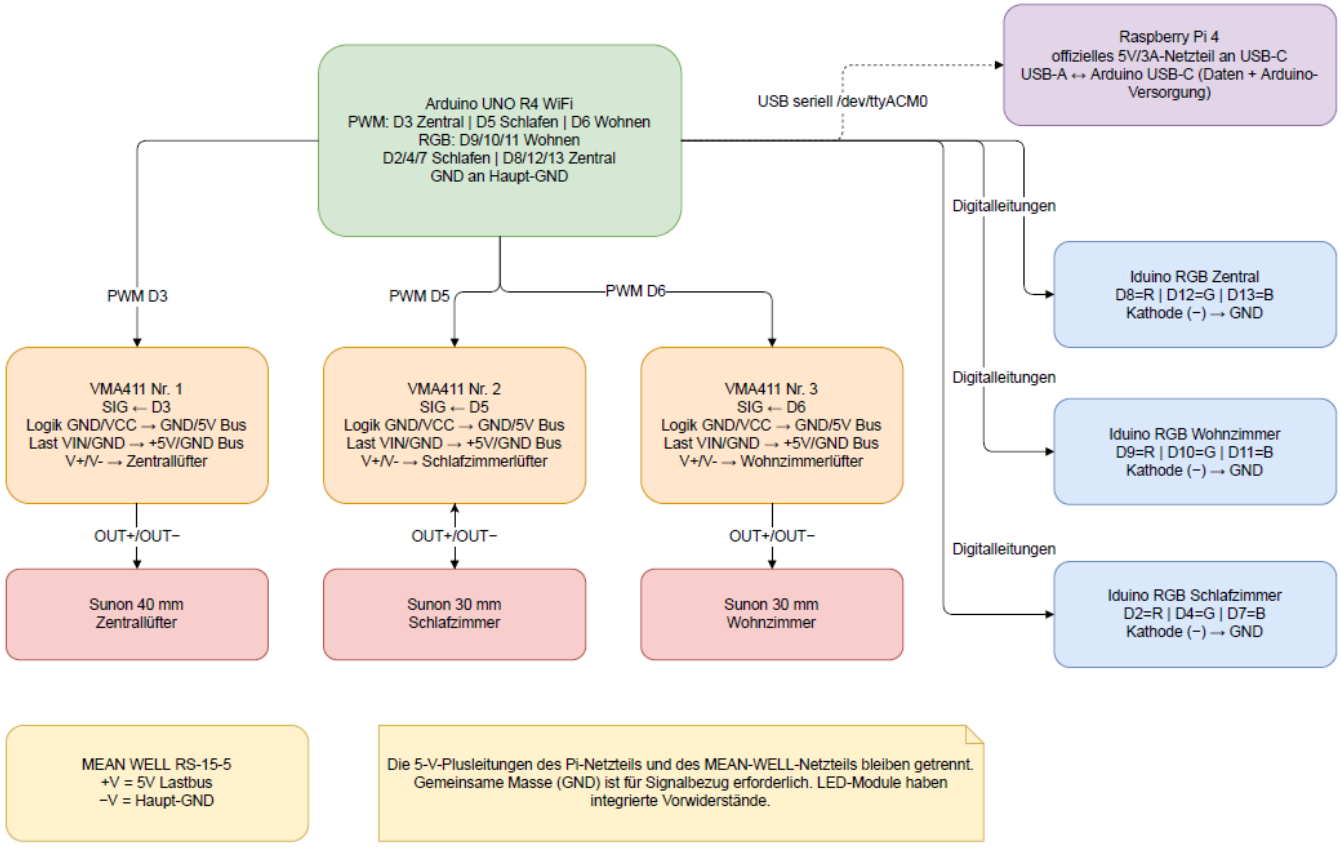


Anhang D Verdrahtungsübersicht Sensorik, I2C Bus, Aktoren und LED Versorgung

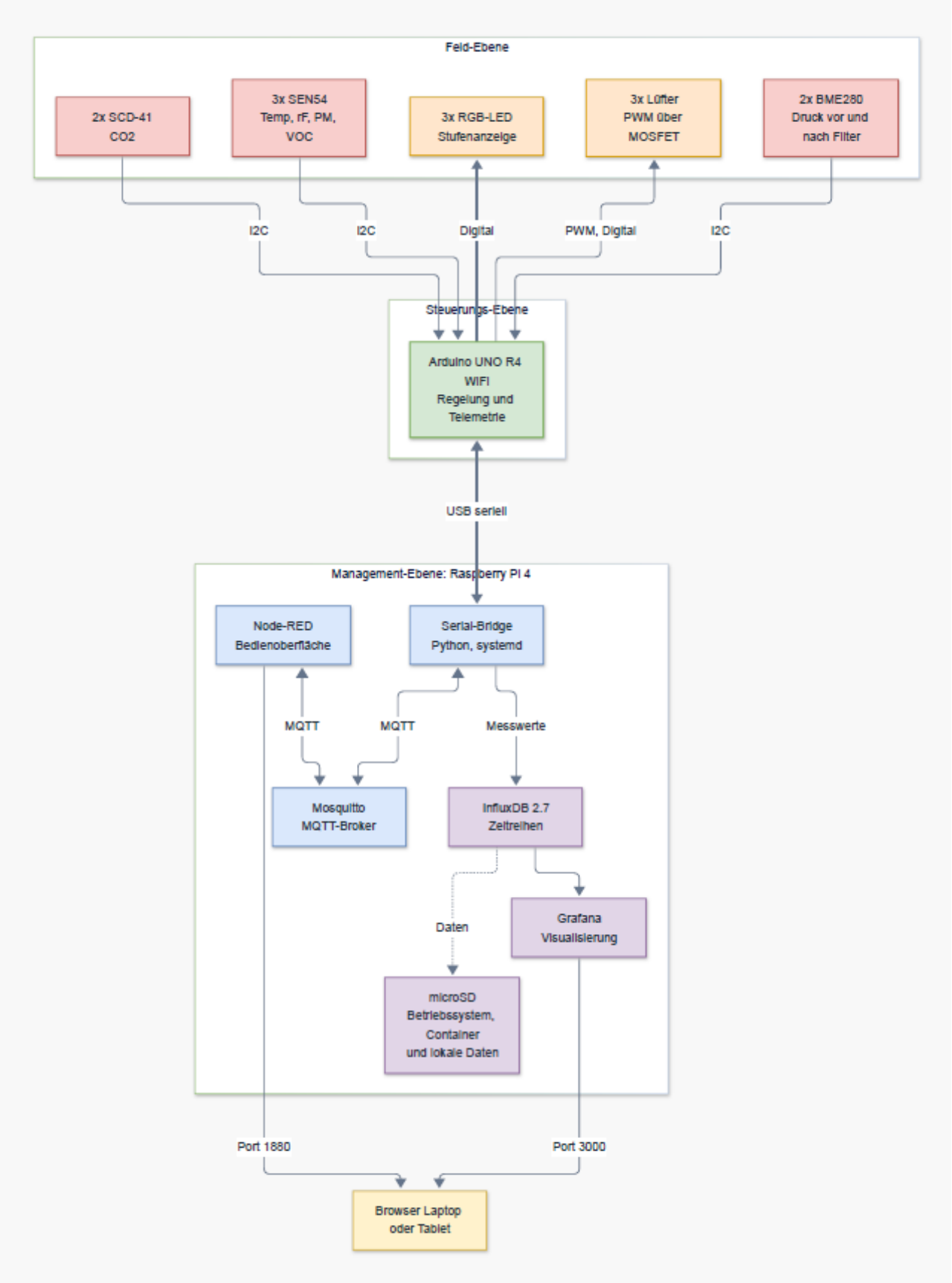
Raumklima-Modell – Sensorik und I2C-Bus



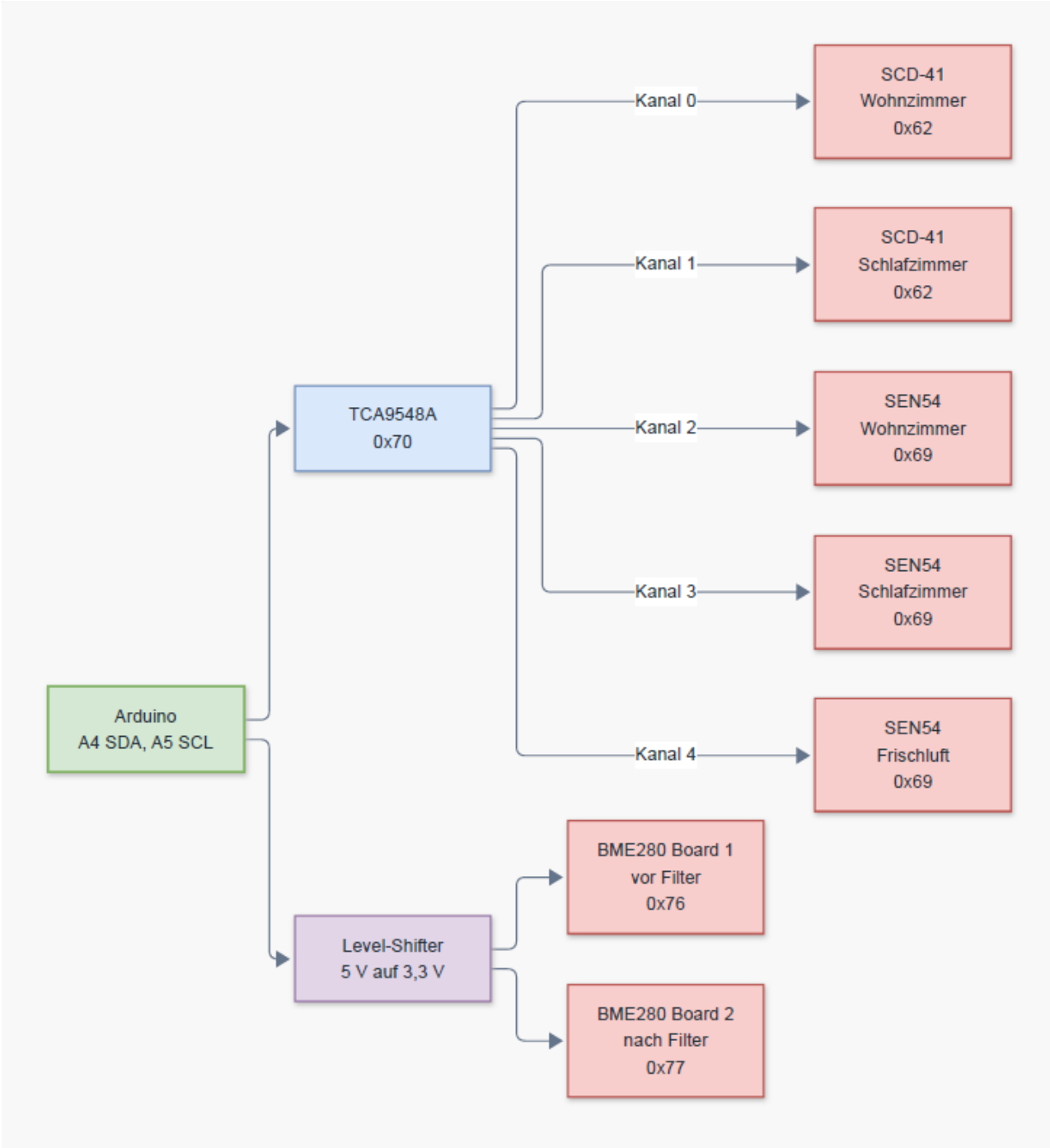
Raumklima-Modell – Aktoren, LEDs und Versorgung



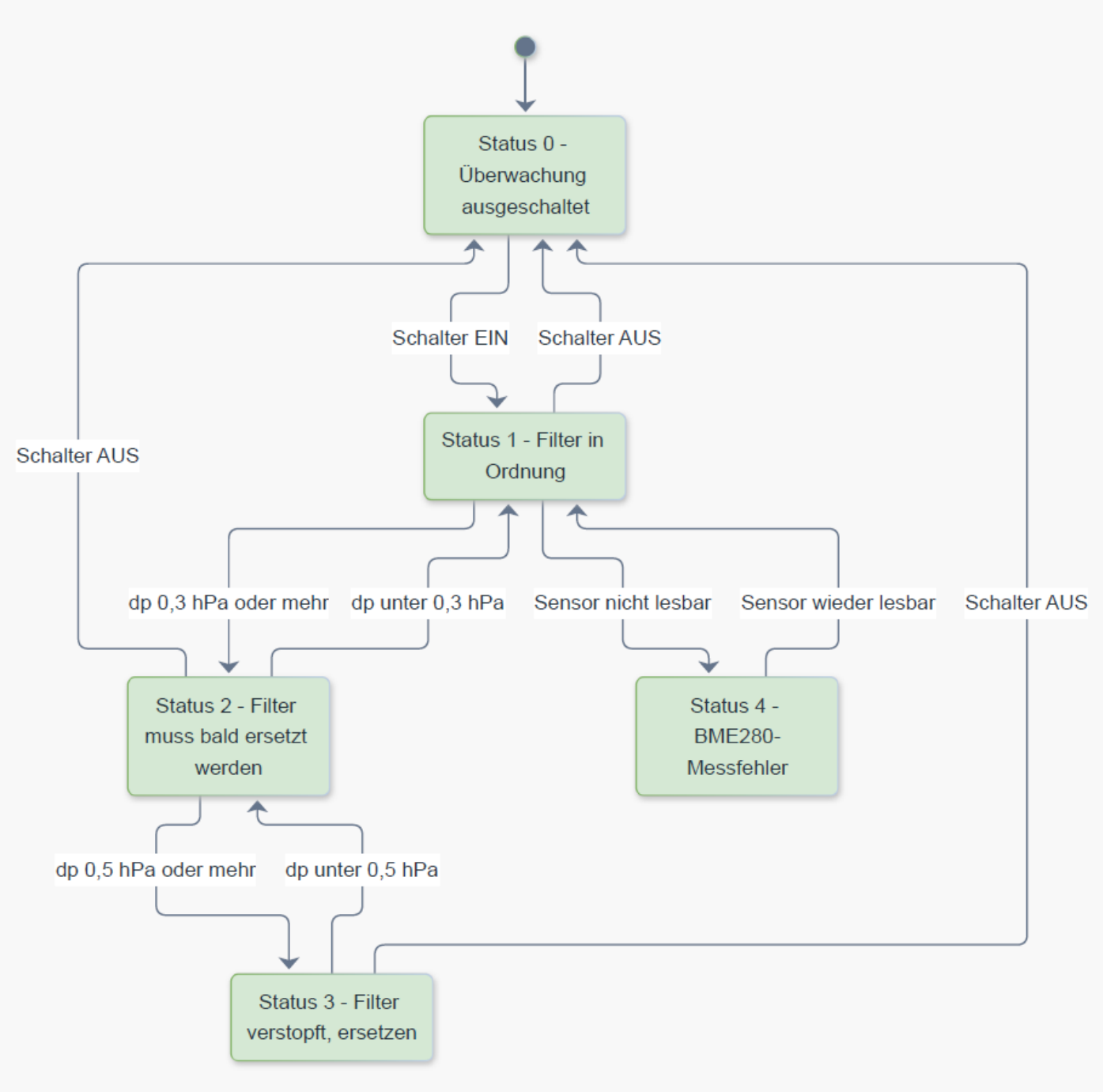
Anhang E Systemarchitektur



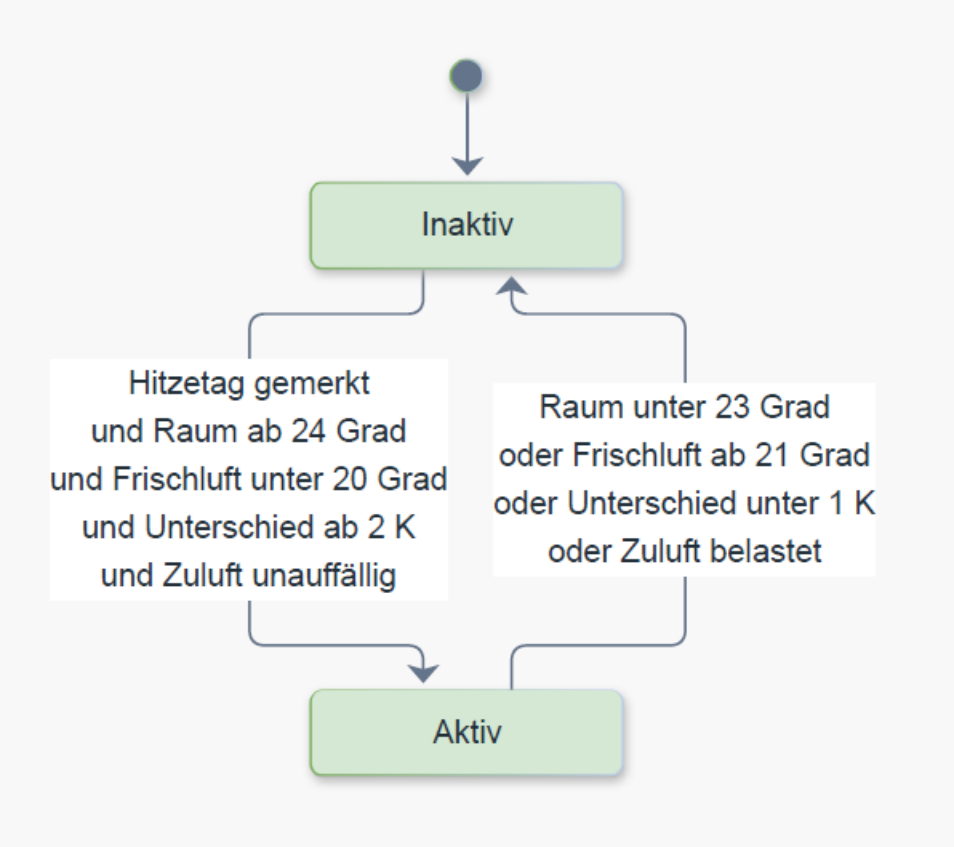
Anhang F I2C-Topologie



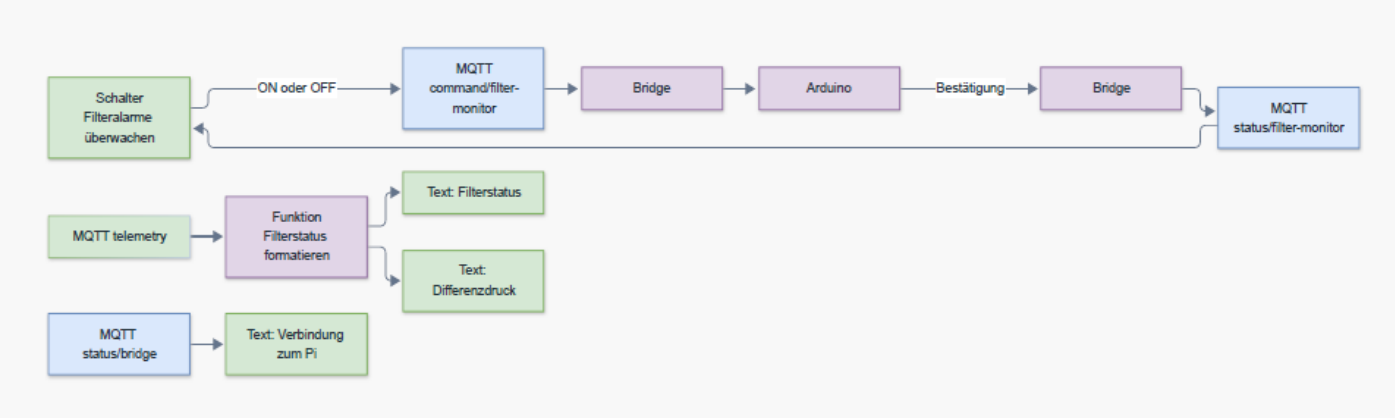
Anhang G Diagramm Filterüberwachung (Differenzdruck)



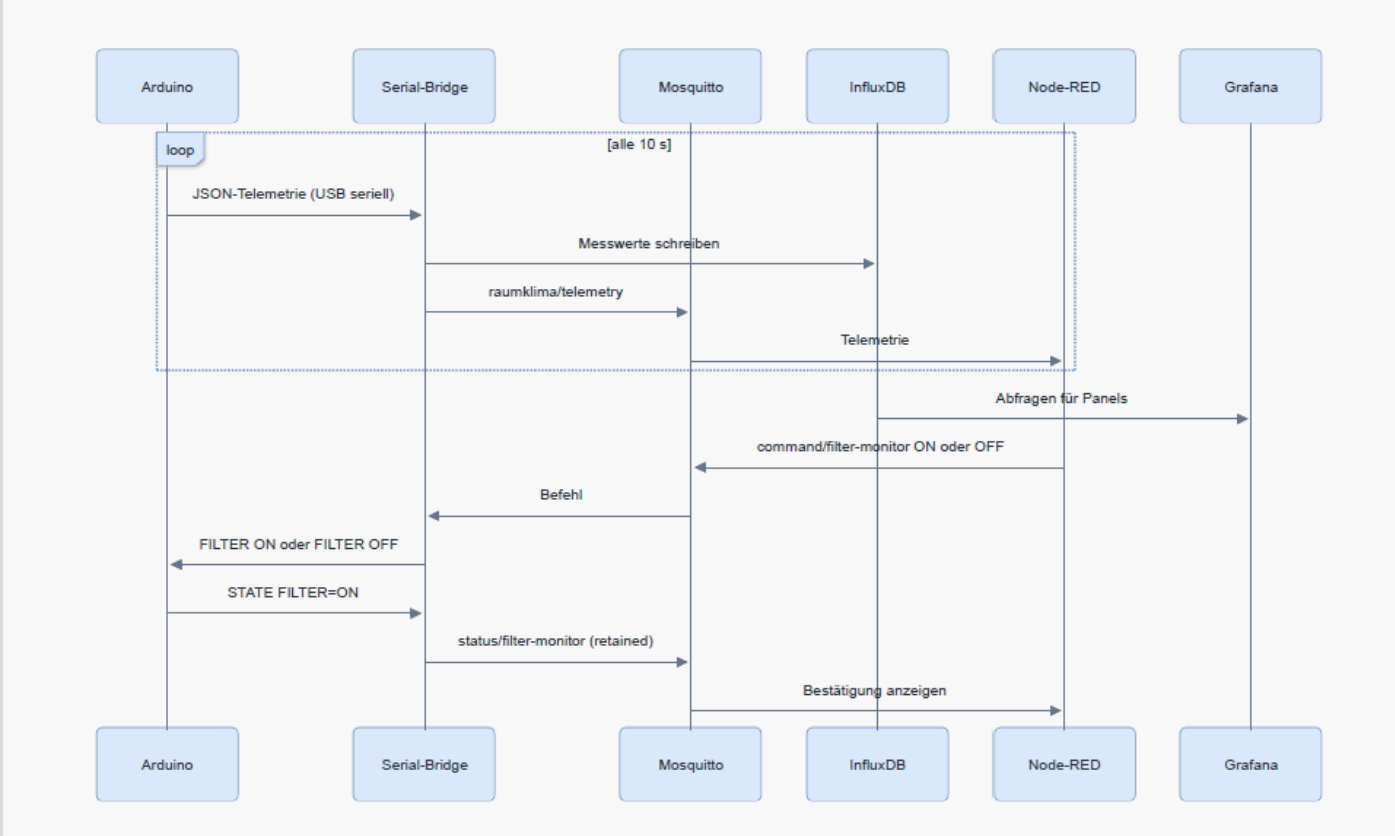
Anhang H Diagramm Nachtkühlung



Anhang I Diagramm Node-RED Bedienoberfläche



Anhang J Datenfluss Diagramm



Anhang K Umsetzung Aufbau Komponenten und Verdrahtung

